SISTEM KONTROL ELEKTRO MEKANIK & ELEKTRONIK

I. PENGANTAR SEPUTAR BUKU BAHAN AJAR

A. Deskripsi

Kurikulum 2013 dirancang untuk memperkuat kompetensi siswa dari sisi pengetahuan. Keterampilan dan sikap secara utuh. Proses pencapaiannya melalui pembelajaran sejumlah mata pelajaran yang dirangkai sebagai suatu kesatuan yang saling mendukung pencapaian kompetensi tersebut. Buku bahan ajar dengan judul Sistem Kontrol Elektromekanik & elektronik ini merupakan salah satu referensi yang digunakan untuk mendukung pembelajaran pada paket keahlian Teknik Otomasi Industri yang diberikan pada kelas XII.

Buku ini menjabarkan usaha minimal yang harus dilakukan siswa untuk mencapai kompetensi yang diharapkan, yang dijabarkan dalam kompetensi inti dan kompetensi dasar. Sesuai dengan pendekatan yang dipergunakan dalam kurikulum 2013, siswa ditugaskan untuk mengeksplorasi ilmu pengetahuan dari berbagai sumber belajar yang tersedia dan terbentang luas di sekitarnya. Peran guru sangat penting untuk meningkatkan dan menyesuaikan daya serap siswa dengan ketersediaan kegiatan pada buku ini. Guru dapat memperkayanya dengan kreasi dalam bentuk kegiatan-kegiatan lain yang relevan bersumber dari lingkungan sosial alam.

Buku siswa ini disusun di bawah koordinasi Direktorat Pembinaan SMK, Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan, dan dipergunakan dalam tahap awal penerapan kurikulum 2013. Buku ini merupakan -dokumen hidup" yang senantiasa diperbaiki, diperbaharui dan dimutakhirkan sesuai dengan dinamika kebutuhan dan perubahan zaman. Masukan dari berbagai kalangan diharapkan dapat meningkatkan kualitas buku ini.

B. Kompetensi Inti dan Kompetensi Dasar

KOMPETENSI INTI	KOMPETENSI DASAR
1. Menghayati dan mengamalkan ajaran agama yang dianutnya.	1.1. Menyadari sempurnanya konsep Tuhan tentang benda-benda dengan fenomenanya untuk dipergunakan sebagai aturan dalam melaksanakan pekerjaan di bidang kontrol elektromekanik. 1.2. Mengamalkan nilai-nilai ajaran agama sebagai tuntunan dalam melaksanakan pekerjaan di bidang kontrol elektromekanik.
2. Menghayati dan mengamalkan perilaku jujur, disiplin, tanggungjawab, peduli (gotong royong, kerjasama, toleran, damai), santun, responsif dan proaktif, dan menunjukkan sikap sebagai bagian dari solusi atas berbagai permasalahan dalam berinteraksi secara efektif dengan lingkungan sosial dan alam serta dalam menempatkan diri sebagai cerminan bangsa dalam pergaulan dunia	2.1. Memilikimotivasiinternal, kemampuan bekerjasama, konsisten, rasa percayadiri, dan sikap toleransi dalam perbedaan konsep berpikir,dan strategi menyelesaikan masalah dalam melaksanakan pekerjaan di bidang kontrol elektromekanik. 2.2. Mampu mentransformasi diri dalam berperilaku: teliti, kritis, disiplin, dan tangguh mengadapi masalah dalam melakukan tugas di bidang kontrol elektromekanik. 2.3. Menunjukkan sikap bertanggung jawab, rasa ingin tahu, santun, jujur, dan perilaku peduli lingkungan dalam melakukan pekerjaan di bidang kontrol elektromekanik.
3. Memahami, menerapkan, menganalisis dan mengevaluasi pengetahuan faktual, konseptual, prosedural dan metakognitif dalam ilmu pengetahuan, teknologi, seni, budaya, dan humaniora dalam wawasan kemanusiaan, kebangsaan, kenegaraan, dan peradaban terkait penyebab fenomena dan kejadian dalam bidang kerja yang spesifik untuk memecahkan masalah.	3.11. Mendeskripsikan prinsip dan operasi kendali elektronik 3.12. Mendeskripsikan prinsip kerja komponen dan gambar kerja system kendali elektronik 3.13. Mendeskripsikan unjuk kerja komponen dan system kendali elektronik 3.14. Mendeskripsikan karakteristik dan spesifikasi inverter (Variable Speed Drive) 3.15. Mendeskripsikan prinsip dan operasi inverter untuk mengatur kecepatan motor

KOMPETENSI INTI	KOMPETENSI DASAR
	listrik (Speed drive) 3.16. Mendeskripsikan fungsi dan gambar kerja inverter (Variabel Speed Drive) untuk mengatur kecepatan motor listrik 3.17. Mendeskripsikan unjuk kerja sirkit kendali motor menggunakan inverter (Variable Speed Drive)
4. Mengolah, menalar, menyaji dan mencipta dalam ranah konkret dan ranah abstrak terkait dengan pengembangan dari yang dipelajarinya di sekolah secara mandiri,bertindak secara efektif dan kreatif dan mampu melaksanakan tugas spesifik di bawah pengawasan langsung	4.11. Mengartikulasi komponen dan system kendali elektronik (Kontrol statis) 4.12. Merakit rangkaian kendali elektronik 4.13. Menguji unjuk kerja system kendali elektronik 4.14. Mengartikulasi fungsi komponen dan spesifikasi inverter (Variable Speed Drive) 4.15. Mengoperasikan inverter sebagai pengatur kecepatan motor listrik (speed drive) 4.16. Merakit sirkit kendali motor menggunakan inverter (Variable Speed Drive) 4.17. Menguji sirkit kendali motor dengan inverter (Variable Speed Drive)

C. Rencana Aktivitas Belajar

Proses pembelajaran pada Kurikulum 2013 untuk semua jenjang dilaksanakan dengan menggunakan pendekatan ilmiah (saintifik). Langkah-langkah pendekatan ilmiah *(scientific approach*) dalam proses pembelajaran yang meliputi: penggalian informasi melalui pengamatan, bertanya, melakukan percobaan, kemudian mengolah data atau informasi, menyajikan data atau informasi, dilanjutkan dengan menganalisis, menalar, menyimpulkan, dan mencipta. Pada buku ini, seluruh materi yang ada pada setiap kompetensi dasar diupayakan sedapat mungkin diaplikasikan secara prosedural sesuai dengan pendekatan ilmiah.

Melalui buku bahan ajar ini, kalian akan mempelajari apa?, bagaimana?, dan mengapa?, terkait dengan masalah sistem kontrol elektropneumatik. Langkah awal untuk mempelajari materi ini adalah dengan melakukan pengamatan (*observasi*). Keterampilan melakukan pengamatan dan mencoba menemukan hubungan-hubungan yang diamati secara sistematis merupakan kegiatan pembelajaran yang aktif, kreatif, inovatif dan menyenangkan. Dengan hasil pengamatan ini, berbagai pertanyaan lanjutan akan muncul. Nah, dengan melakukan penyelidikan lanjutan, kalian akan memperoleh pemahaman yang makin lengkap tentang masalah yang kita amati.

Dengan keterampilan ini, kalian dapat mengetahui bagaimana mengumpulkan fakta dan menghubungkan fakta-fakta untuk membuat suatu penafsiran atau kesimpulan. Keterampilan ini juga merupakan keterampilan belajar sepanjang hayat yang dapat digunakan, bukan saja untuk mempelajari berbagai macam ilmu, tetapi juga dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

Pengamatan

Melibatkan pancaindra, menggunakan penglihatan untuk membaca fenomena (visual), pendengaran untuk merekam suatu informasi (audio), termasuk melakukan pengukuran dengan alat ukur yang sesuai. Pengamatan dilakukan untuk mengumpulkan data dan informasi.

Membuat Inferensi

Merumuskan Penjelasan berdasarkan pengamatan. Penjelasan ini digunakan untuk menemukan pola-pola atau hubungan-hubungan antar aspek yang diamati, serta membuat prediksi atau kesimpulan.

Mengkomunikasikan

Mengkomunikasikan hasil penyelidikan baik lisan maupun tulisan. Hal yang dikomunikasikan termasuk data yang disajikan dalam bentuk tabel, grafik, bagan, dan gambar yang relevan.

Buku bahan ajar ―Sistem Kontrol Elektromekanik & elektronik" ini, digunakan untuk memenuhi kebutuhan minimal pembelajaran pada kelas XII, semester ganjil dan genap, mencakupi kompetensi dasar 3.11 dan 4.11 sampai dengan 3.17 dan 4.17., yang terbagi menjadi lima.......kegiatan belajar, yaitu :

II. PEMBELAJARAN

1. Kegiatan Belajar 1:
Prinsip Kendali Elektronik

Indikator Keberhasilan:

Setelah menyelesaikan kegiatan belajar ini, diharapkan siswa mampu:

- Menjelaskan prinsip kontrol elektronik
- Mengaplikasikan piranti kontrol elektronika

A. URAIAN MATERI

1.1 Prinsip sistem kontrol

Sistem kontrol adalah sekumpulan komponen yang bekerja sama di bawah pengarahan suatu kecerdasan mesin. Dalam kebanyakan kasus, rangkaian elektronika menghasilkan kecerdasan, dan komponen-komponen elektromekanik, seperti sensor dan motor, bertindak sebagai antar-muka dengan dunia fisik.Sebagai contoh data loger intensitas pemanasan matahari, arah dan kecepatan angin, kelembaban, suhu dan curah hujan yang ditransmisikan melalui frekuensi gelombang radio dan data tersebut diterima oleh sebuah receiver yang terhubung dengan system komputer yang terpasang jauh dari objek sensor yang secara simultan dan kontinyu memberikan informasi tentang kondisi cuaca di lapangan, dimana perangkat sensor tersebut terpasang pada tiang yang posisinya dapat di atur secara remote. Komputer lalu menampilkan kondisi tersebut secara real time di sisi operator.Untuk merancang dan memperbaiki sistem ini, anda harus menguasai ilmu elektronika dan digital, ilmu mekanika dan prinsip-prinsip sistem kontrol.

Pada masa lalu, yang disebut mesin atau proses otomatis adalah semua yang dikontrol,

baik dengan rangkaian elekronika analog, maupun dengan rangkaian yang memakai saklar (switch), relai (relay) dan pewaktu (timer). Sejak kemajuan mikroprosesor yang murah,semakin banyak piranti dan sistem yang dirancang-ulang untuk menyertakan pengontrol mikroprosesor. Contohnya termasuk mesin fotokopi, mesin minuman-ringan, robot dan pengontrol proses industri. Banyak dari mesin-mesin ini memanfaatkan kemampuan pengolahan mikroprosesor yang semakin ampuh, dan akibatnya menjadi lebih canggih dan menyertakan fitur-fitur baru. Pada materi ini akan dibahas mengenai kontrol elektronika analog, untuk sistem control digital dan mikrokontroller/mikroprosesor akan dibahas secara terpisah pada mata pelajaran Sistem control terprogram.

Salah satu penggunaan komponen-komponen dasar elektronika yang telah dipelajari (misalnya : transistor, SCR, triac dan sebagainya) adalah sebagai saklar statis atau relay statis, karena komponen-komponen tersebut mempunyai kondisi ON (*ON state*) dan kondisi OFF (OFF state).

Disebut saklar statis, karena tidak mempunyai titik kontak (–*Contact point*") tetapi dapat terhubung/terputus tanpa adanya gerakan mekanik.

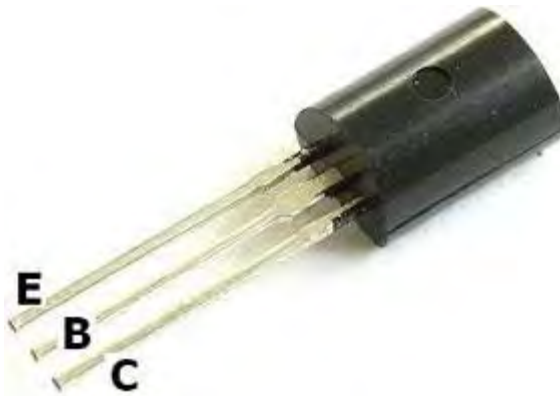
Perbedaan dan kelebihan saklar statis terhadap saklar mekanik, antara lain :

a. Saklar statis tidak mempunyai bagian yang bergerak sehingga terhindar dari kerusakan akibat frekuensi pemakaian, serta kerusakan ketidak-sempurnaan kontak sebagaimana yang sering terjadi pada titik kontak saklar mekanik.

b. Waktu yang diperlukan untuk peralihan kontak (*contact transfer*) saklar statis lebih cepat. Pada saklar mekanik, peralihan kontaknya diperlukan waktu beberapa milidetik sedangkan pada saklar statis hanya beberapa mikro detik.

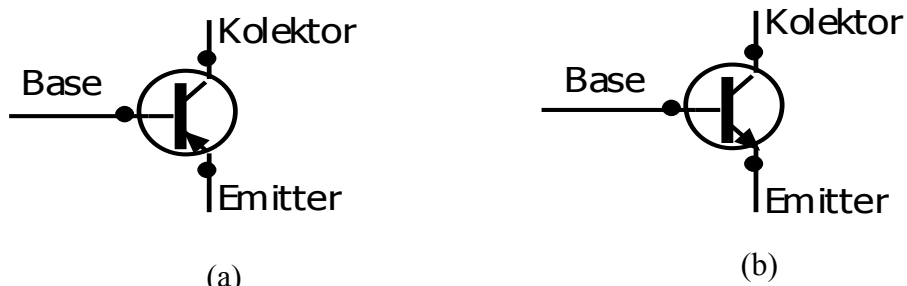
c. Dalam peristiwa peralihan kontak, pada saklar mekanik sering terdapat osilasi kontak sebelum terjadi kontak sempurna, tetapi dalam saklar statis langsung terjadi kontak sempurna.

1.2 Transistor

Dasar-dasar transistor sebagaimana telah dibahas pada mata pelajaran Dasar dan pengukuran listrik 2 pada pokok bahasan Piranti-piranti elektronika daya. Dimana dalam aplikasinya selain berfungsi sebagai penguat (amplifier) dapat juga digunakan sebagai saklar elektronis. Pada bahasan ini akan di ulas mengenai transistor berdasarkan fungsi serta aplikasinya.

Gambar 1.1 Bentuk fisik transistor

Fungsi tansistor sangat menentukan kinerja dari sebuah rangkaian elektronika.Dalam sebuah sirkuit/rangkaian elektronika, transistor berfungsi sebagai jangkar rangkaian. Secara fisik, Transistor adalah sebuah komponen elektronika semi konduktor yang memiliki 3 kaki, yang masing-masing kakinya diberi nama basis (B), colector (C) dan emitor (E). Dalam sebuah sirkuit, fungsi Transistor dapat digunakan sebagai sebuah penguat (amplifier), sirkuit pemutus dan penyambung (switching), stabilisasi tegangan (stabilisator), modulasi sinyal dan berbagai fungsi lainnya.Berdasarkan susunan semi konduktor, Transistor di bedakan menjadi 2 tipe yaitu transistor PNP dan transistor NPN. Untuk membedakan transistor PNP dan NPN dapat di lihat dari arah panah pada kaki

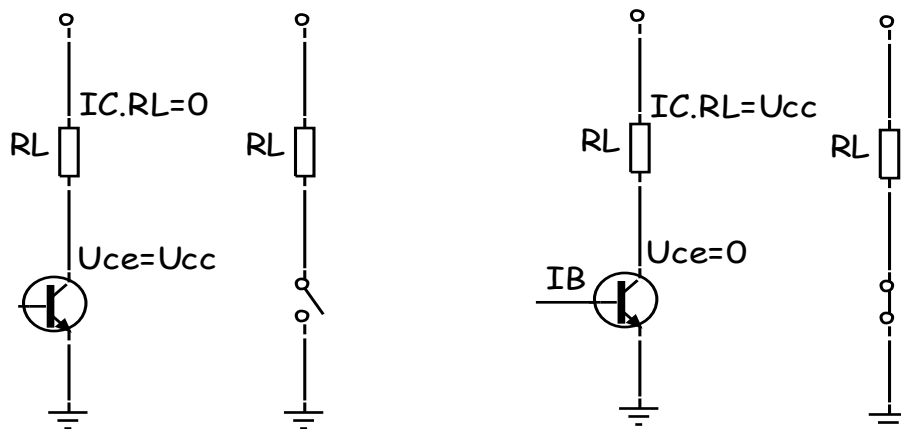
emitornya. Pada transistor PNP anak panah mengarah ke dalam dan pada transistor NPN arah panahnya mengarah ke luar. Pada saat ini Funsi Transistor telah banyak mengalami perkembangan, sekarang sebuah transistor sudah dapat digunakan sebagai memory dan pemroses sebuah getaran listrik dalam dunia prosesor komputer.Bukan hanya fungsi transistor saja yang berkembang, bentuk dari transistor juga mengalami perubahan, saat ini transistor telah berhasil di ciptakan dalam ukuran super kecil, yaitu hanya dalam ukuran nano mikron (transistor yang dikemas dalam prosesor komputer).Dalam dunia elektronika, transistor juga memiliki bentuk jelajah tegangan kerja dan frekuensi yang sangat besar dan lebar.

Penggunaan transistor dalam sebuah rangkaian analog adalah sebagai amplifier, switch, stabilitas tegangan, dan lain-lain.Dalam rangkaian digital selain di gunakan sebagai saklar yang memiliki kecepatan tinggi juga dapat digunakan sebagai pemroses data yang akurat dan sebagai memory.Cara kerja transistor yang tidak serumit komponen penguat lainnya, seperti tabung elektronik, dan kemampuannya yang berkembang secara berkala, dan juga bentuk fisiknya yang semakin berkembang, membuat transistor menjadi pilihan utama para penghobi elektronika dalam menyusun suatu konsep rangkaian elektronika.Bahkan saat ini bentuk fisik dan fungsi transistor telah berada satu tahap diatas sebelumnya.Sekarang fungsi transistor banyak yang sudah terintegrasi dan disatukan dari beberapa jenis transistor menjadi satu buah komponen yang lebih kompak yang dalam dunia elektronika biasa disebut dengan Integrated Circuit (IC). Integrated Circuit mempunyai cara kerja dan kemampuan yang lebih kompleks, tetapi mempunyai bentuk fisik yang ringkas sehingga tidak banyak memakan tempat.Namun tidak dapat dipungkiri, walaupun fisiknya berkembang menjadi satu komponen baru, namun fungsi transistor tetap memegang peranan vital dalam sebuah rangkaian elektronika.

Gambar 1.2 (a) Simbol Transistor PNP dan (b) Simbol Transistor NPN

Transistor sebagai switch

a. Kondisi CUT-OFF Transistor

Gambar2a. dibawah ini memperlihatkan transistor yang dirangkai sedemikian rupa (rangkaian Common-Emitter), dimana tahanan beban R_L dianggap terhubung seri dengan lainnya.

Tegangan total yang terdapat pada ujung-ujung rangkaian seri ini sama dengan tegangan catunya (U_{CC}) dan diberi notasi U_R dan U_{CE}.

Gambar 1.3 Rangkaian Common-Emitter

Menurut hukum Kirchoff :

$$U_{CC} = U_{CE} + U_R$$

Arus kolektor I_C mengalir melalui R_L dan drop tegangannya adalah $I_C.R_L$ sehingga

$U_{CC} = U_{CE} + I_C \cdot R_L$

Misalkan basis memperoleh bias negatif (reverse) yang Sedemikian besar sehingga memutuskan (cut-off) arus kolektor, dan untuk keadaan ini arus kolektor sama dengan nol.

$I_C \cdot R_L = 0$ sehingga $U_{CC} = U_{CE}$

Bila transistor kita anggap sebagai switch, maka pada keadaan ini switch tersebut akan ada dalam keadaan terbuka (OFF).

b. Kondisi Saturasi Transistor

Bila sekarang basis diberi bias arus maju (forward) sampai pada titik dimana seluruh tegangan U_{CC} muncul sebagai drop tegangan pada R_L, maka pada keadaan ini dapat ditulis :

$$I_C \cdot R_L = U_{CC}$$

Dari persamaan :

$$U_{CC} = I_C \cdot R_L + U_{CE}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_L$$

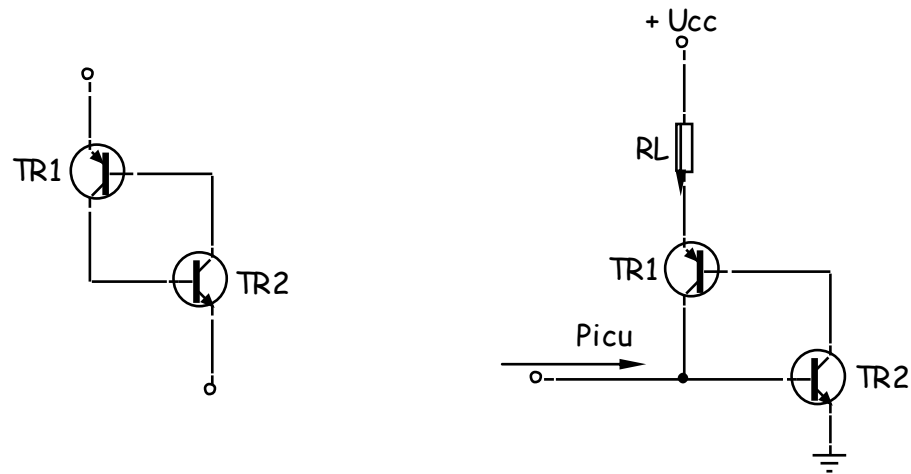
Karena $I_C \cdot R_L = U_{CC}$ maka $U_{CC} - I_C . R_L = 0$

dan $U_{CE} = 0$

Dengan demikian bila I_C diperbesar pada suatu titik dimana seluruh tegangan U_{CC} muncul pada R_L, maka tidak tersisa tegangan pada kolektor.Keadaan seperti ini dikatakan kondisi saturasi (jenuh) dari transistor tersebut. Dan jika transistor dianggap sebagai sakelar (switch), maka pada kondisi ini switch tersebut dalam keadaan tertutup (ON).

c. Dasar Latching

Dua buah transistor dari tipe PNP dan NPN dikatakan komplement jika mempunyai karakteristik yang serupa.

Gambar 1.4.memperlihatkan cara menghubungkan transistor yang komplementer tadi sedemikian rupa sehingga membentuk rangkaian Cascade.

Gambar 1.4 Cara menghubungkan transistor

Rangkaian ini bila diberi catu daya sedemikian rupa seperti yang terlihat pada gambar 1.4, dan dimana basis dalam keadaan terbuka serta dengan suatu kancing (latch).

Dalam keadaan demikian ini transistor tidak bekerja (cut-off), atau sama saja dengan switch dalam keadaan terbuka.

Dengan mengabaikan arus bocor, maka dapat dikatakan I_C = 0. Salah satu cara guna menutup latch ini adalah dengan system penyulutan (triggering) pada elektroda basis dari salah satu transistor tersebut. Misal trigger positif diberikan pada basis dari Q_2 ini berarti emitter basis Q_2 memperoleh forward bias dan Q_2 mulai menghantar. Karena kolektor Q_2 dihubungkan langsung dengan basis Q_1 maka Q_1 memperoleh input dan selanjutnya akan memberikan penguatan sehingga timbul I_C pada Q_1 dan arus ini merupakan input bagi Q_2 dan akan diperkuat lagi oleh Q_2 tersebut.

Proses penguatan ini berlangsung terus sehingga transistor-transistor tersebut mencapai keadaan saturasi, dan dalam keadaan saturasi ini transistor akan merupakan rangkaian hubung singkat sehingga tegangan pada latch akan sama dengan nol dan arus yang mengalir adalah :

$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_L}$$

Guna menutup latch tersebut dapat juga dilakukan dengan memberi trigger negatif pada basis Q_1 yang mana akan menyebabkan forward bias pada $Q_{1.}$

Cara lain adalah dengan memberi tegangan U_{CC} sedemikian besar sehingga melampaui tegangan break-down dari dioda kolektor salah satu dari transistor tersebut. Dengan terjadinya break-down ini, maka timbul kolektor yang akan diterima basis transistor berikutnya dan diperkuat dan cara ini disebut sebagai –Break Over System".

Guna membuka latch tersebut ada beberapa cara, yaitu :

1. Mengurangi tegangan catu U_{CC} sehingga arus beban berkurang.
2. Memperbesar nilai R_L atau sama sekali mencabutnya.

Tugas 1.

1. Buat gambar rangkaian pengontrolan pintu garasi menggunakan trasistor dengan sensor cahaya!
2. Buatlah Pengontrolan start dua buah motor secara berurutan.
3. Buatlah rangkaian pengontrolan balik putaran motor DC.
4. Carilah gambar, penjelasan dan berbagai aplikasi transistor di internet atau sumber lain !

B. Tes Formatif.

1. Jelaskan bagaimana cara memberi penyulutan pada trasistor jenis PNP ?
2. Apakah yang akan terjadi jika kaki basis transisor jenis NPN diberi polaritas negatif ?
3. Gambar dan jelaskan dua buah trasistor yang digunakan sebagai latching ?
4. Apakah yang membedakan antara transistor jenis PNP dengan transistor jenis NPN. ?
5. Apakah keuntungan pengontrolan beban menggunakan transistor dibandingkan sakelar mekanik ?

C. TUGAS PRAKTIKUM

a. Pengaturan Putaran Motor Menggunakan Transistor

1. *Alat dan Bahan*

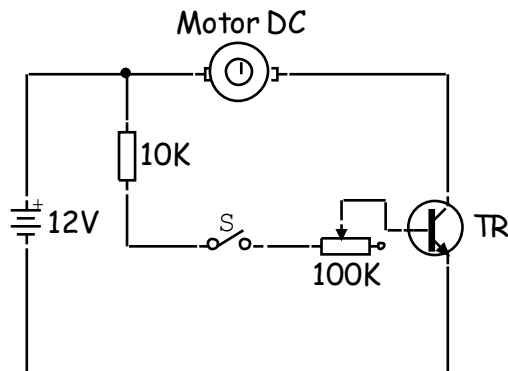
   1.1. Power Supplay 12V/ 3A …………………. 1 buah

1.2. Transistor C 1060. ………………………... 1 buah
1.3. Potensiometer 100KΩ/1W ……………… 1 buah
1.4. Tahanan 10KΩ/5W ………………………… 1 buah
1.5. Motor DC 12V………………………………… 1 buah
1.6. Kabel Penghubung ………………………… secukupnya

2. *Keselamatan Kerja*

2.1. Pergunakan peralatan dan kompenen lain dengan baik!
2.2 Periksalah peralatan dan kompenen sebelum digunakan.
2.3. Matikan terlebih dahulu sumber tegangan pada saat membuat dan membongkar rangkaian pengawatan.
2.4. Lakukan pekerjaan sesuai langkah kerja!

3. *Langkah Kerja*

3.1. Siapkan alat dan bahan yang diperlukan!
3.2. Buat rangkaian percobaan seperti gambar 1.5
3.3. Yakinkan sakelar (S) pada posisi OFF dan potensiometer pada tahanan maximum!

Gambar 1.5Pengaturan Putaran Motor menggunakan Transistor

3.4. Gerakkan sakelar (S) pada posisi ON.! Apakah yang terjadi pada motor? Ukur tegangan yang jatuh pada :
a. Motor
b. Emiter – Kolektor
c. Emiter – Basis
3.5. Atur potensiometer pada tahanan ½ maximum.! Apakah yang terjadi pada motor? Ukur tegangan pada :
a. Motor

b. Emiter – Kolektor
c. Emiter – Basis

3.6. Atur potensiometer pada tahanan minimum.! Apakah yang terjadi pada motor? Ukur tegangan pada :
a. Motor
b. Emiter – Kolektor
c. Emiter – Basis

3.7. Dengan mengatur tahanan potensiometer. Apakah putaran motor dapat diatur? Jelaskan.!

3.8. Dari hasil pengukuran langkah 2.4. $^s/_d$ 2.6. Masukan pada table1a.

3.9. Matikan sakelar (S). Lepaskan semua rangkaian! Kembalikan semua peralatan pada tempat semula!

Tabel 1a.

Potensiometer	Tegangan pada			Keadaan Motor
	Motor	E - B	E - K	
Maximum				
½ Maximum				
Minimum				

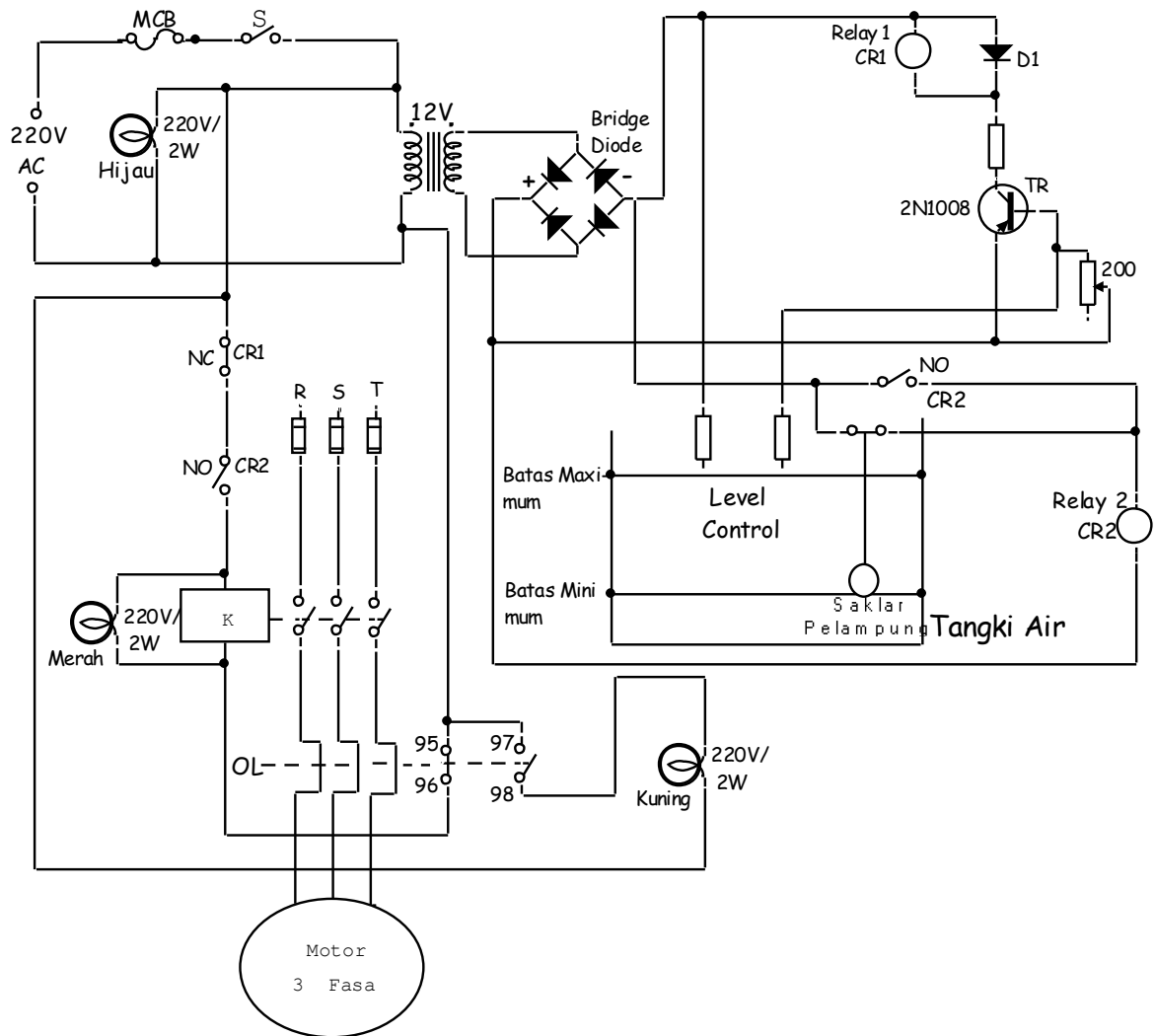
b. Pengontrolan Level Air Secara Otomatis

1. Alat dan Bahan

Tranformator 220V/12V,3A ………………………….. 1Buah.
Motor induksi 3 Fasa, 2HP, 220V ……………………. 1Buah.
Tangki air …………………………………………………….. 1Buah.
Sekering, 10A ……………………………………. ……. 3 Buah.
MCB 1 Fasa, 3A ………………………………………. …. 1 Buah.
Kontaktormagnit 220V, 10A ………………………….. 1 Buah.
Relay 12V, 2NO, 2NC ……………………………………. 2 Buah.
Transistor 2N1008 ……………………………………….. 1Buah.
Sakelar Pelampung ………………………………………. 1 Buah
Elektroda / Level Kontrol ……………………………… 1 Buah.
Lampu Indikator ……………………………………….. …3 Buah.

Over Load, 2A ………………………………………… ….1 Buah.
Dioda IN5402……………………………………………..1 Buah.
Dioda IN4003 …………………………………………….. 4 Buah.
Tahanan 220Ω/1W ……………………………………… 1 Buah.
Potensiometer, 200Ω/1W …………………………….. 1Buah.
Sakelar SPST ………………………………………………. 1 Buah.

2. *Keselamatan Kerja*
   - 2.1. Pergunakan peralatan dan komponen lain dengan baik.
   - 2.2. Periksalah peralatan dan komponen sebelum digunakan!
   - 2.3. Matikan terlebih dahulu sumber tegangan, pada saat membuat rangkaian pengawatan.
   - *2.4.* Lakukan percobaan sesuai langkah kerja!

3. *Langkah Kerja*
   - 3.1. Siapkan alat dan bahan yang diperlukan!
   - 3.2. Buat rangkaian percobaan seperti gambar 1d.
   - 3.3. Yakinkan sakelar SPST pada posisi OFF, tangki air dalam keadaan kosong,potensiometer pada posisi ½ maximum dan jarak kedua elektroda 10 Cm.!
   - 3.4. Gerakkan sakelar SPST pada posisi ON.! Apakah yang terjadi pada motor pompa air (motor 3 fasa)? Ukur tegangan pada
     - a. Transistor
     - b. Relay 1
     - c. Relay 2
     - d. Kontaktormagnit
   - 3.5. Masukan air ke dalam tangki sampai permukaan air menyentuh sakelar pelampung (batas minimum), sehingga kontaknya terdorong ke atas. Apakah yang terjadi pada motor pompa? Ukur tegangan pada :
     - a. Transistor
     - b. Relay 1
     - c. Relay 2
     - d. Kontaktormagnit
   - 3.6. Masukan kembali air ke dalam tangki sampai permukaan air menyentuh elektroda ((batas maximum). Apakah yang terjadi pada motor pompa.? Ukur tegangan pada :
     - a. Transistor
     - b. Relay 1
     - c. Relay 2
     - d. Kontaktormagnit

Gambar 1.6 Pengontrolan Level Air Secara Otomatis

3.7. Kosongkan air sampai permukaan air tidak menyentuh elektroda.! Apakah yang terjadi pada motor pompa.? Ukur tegangan pada :
   a. Transistor
   b. Relay 1
   c. Relay 2
   d. Kontaktor

3.8. Kosongkan air sampai permukaan air tidak menyentuh sakelar pelampung.! Apakah yang terjadi pada motor.? Ukur tegangan pada:

a. Transistor
b. Relay 1
c. Relay 2
d. Kontaktormagnit

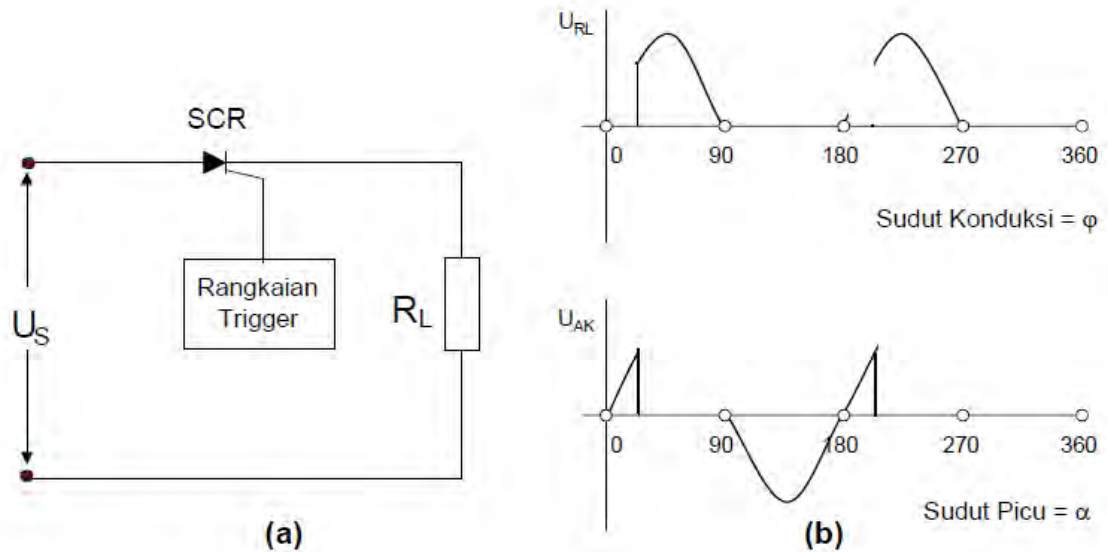
3.9. Data hasil pengukura dari langkah 3.4 $^{s}/_{d}$ 3.7 masukan pada table 1b.
3.10. Buat kesimpulan dari hasil percobaan tsb.

Tabel 1b.

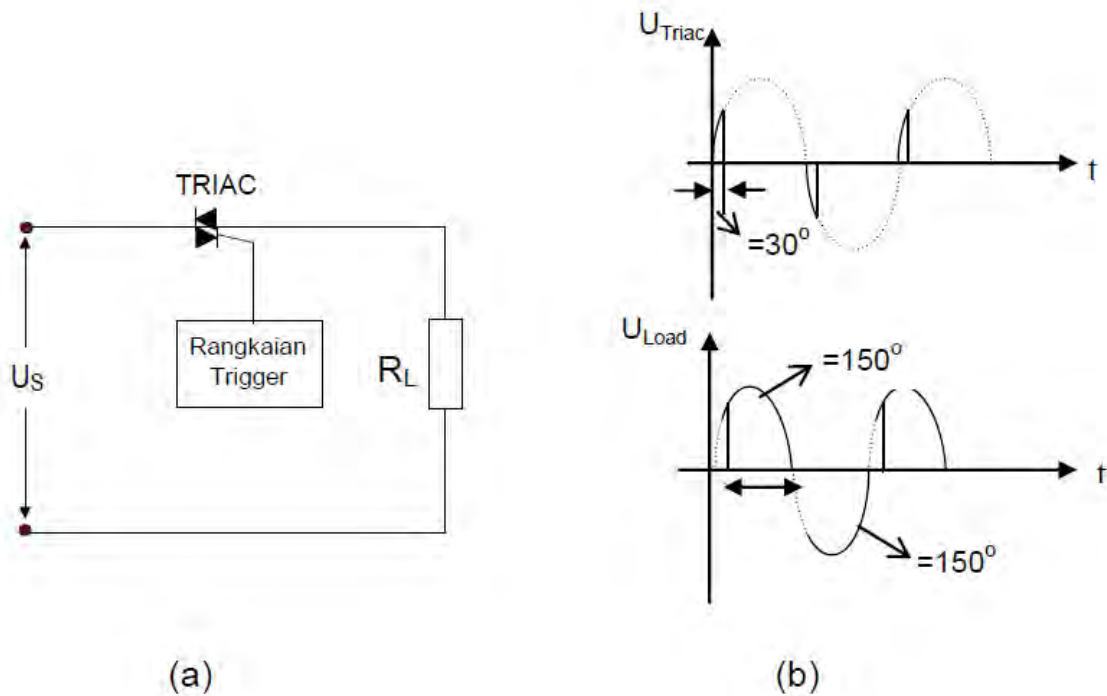
KeadaanTangki Air	Tegangan pada Relay 1	Tegangan pada Relay 2	Tegangan pada Emiter-Kolektor	Keadaan Motor 3Fasa
Kosong				
Batas Minimum				
Batas Maximum				
Batas Minimum				

1.3 Thyristor

Sebagaimana dibahas dalam materi Elektronika Daya 1 bahwa thyristor merupakan komponen break over, khususnya SCR dan triac adalah komponen break over yang tegangan konduknya dapat diatur melalui sinyal picu pada gate.
Di dalam rangkaian konverter arus bolak-balik thyristor merupakan komponen utama, melalui pengendalian sinyal picu (*trigger*), maka besarnya sudut konduk = $sudut\ \varphi$(*conduction angle*) dan sudut picu/ penyalaan = $sudut\ \propto$ (*firing delay angle*) dapat diatur.

Rangkaian dasar SCR, beban, dan sumber tegangan diperlihatkan pada gambar 1.7 .(a), sedangkan gambar 1.7 .(b) memperlihatkan bahwa pada sudut konduk = 120^{o}maka sudut picu = 60^{o}.

Gambar 1.7Rangkaian Dasar SCR, Sudut Picu, dan Sudut Konduksi

Pada interval ½ gelombang positive tegangan sumber (Us), anoda (A) adalah positip terhadap katoda (K), thyristor (SCR) dalam kondisi forward bias, selanjutnya dengan adanya sinyal picu (*trigger*) maka thyristor konduksi/menyala pada ωt = sudut ∝.

Pada interval negatip berikutnya, anoda thyristor negatip terhadap katoda, sehingga thyristor pada kondisi reverse bias. Interval waktu antara tegangan U_S bergerak positive sampai dengan thyristor konduksi disebut sudut picu atau sudut penyalaan (*firing delay angle*) = $sudut$ ∝.

Gambar 1.8Rangkaian Dasar Triac, Sudut Picu, dan Sudut Konduksi

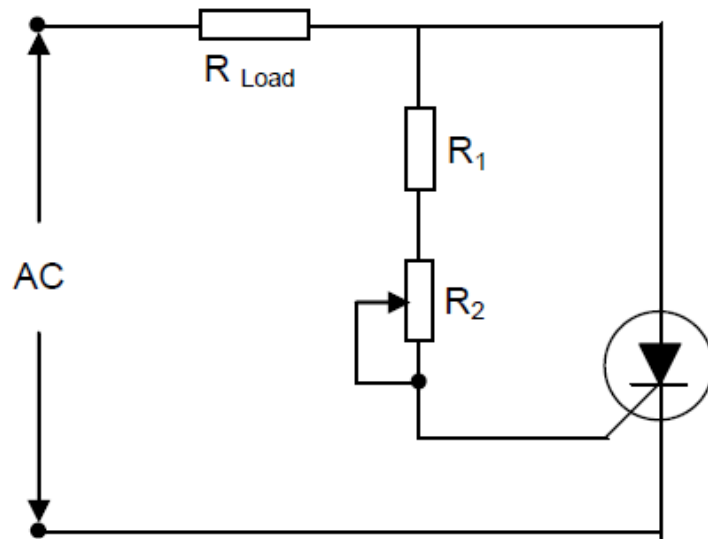
Pengaturan sudut konduk/sudut picu dilaksanakan melalui pengaturan sinyal picu, pengaturan ini dapat dilaksanakan dengan 2 sistem :

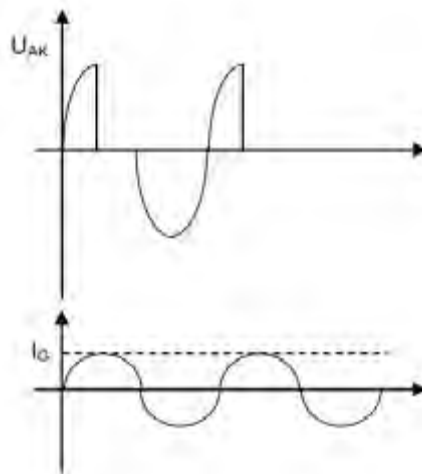
a. Dengan pengaturan besarnya arus picu (I_G) yang diberikan pada gate. Semakin besar I_G, semakin rendah U_{BRF} sehingga makin lebar sudut konduk atau makin sempit sudut picunya.

b. Dengan mengatur waktu / saat (T) diberikannya sinyal picu. Dalam hal ini besarnya I_G agar $U_{BRF} \approx$ nol volt langsung dipenuhi, tetapi saat (timing) pemberian sinyal picunya diatur, semakin awal datangnya sinyal picu makin lebar sudut konduk dan sebaliknya semakin lambat/tertunda sinyal picu makin sempit sudut konduk yang terjadi.

Didalam praktek pada umumnya menggunakan cara kedua (sistem b) dan sebagai sinyal picu menggunakan sinyal berbentuk pulsa atau tegangan tajam (*spike voltage*).

1.3.1 Rangkaian Picu Sederhana

Perhatikan gambar 1.9 yang memperlihatkan rangkaian pengatur sinyal picu sederhana.

(a)

Gambar 1.9Rangkaian pengatur picu sederhana

Gambar 1.10Bentuk gelombang UAK dan IG

Saat terpenuhinya arus picu (t) dapat dikontrol melalui pengaturan R_2, karena gelombang sinyal pada gate adalah sefasa dengan tegangan anoda-katoda U_{AK} atau tegangan sumber U_S.

Rangkaian picu demikian hanya dapat digunakan untuk mengatur daerah (range) sudut picu antara 0°sampai 90°.bentuk gelombang arus gate dan tegangan anoda-katoda diperlihatkan pada gambar 1.10.

Contoh Soal :

Dari gambar 1.9 dan 1.10 , diketahui : tegangan sumber = 115 V_{rms}, I_G = 15 mA dan R_1 = 3 k ohm.

Bila dikehendaki sudut picu = 90°, berapakah besarnya R2 ?

Penyelesaian :

Pada sudut picu = 90_o, maka tegangan sesaat ($U_{t)}$:

= Up = 115. $\sqrt{2}$ V= 162 V

dengan mengabaikan tegangan jatuh pada beban dan pada dioda gate katoda, agar pada gate mengalir I_C = 15 mA diperlukan tahanan.

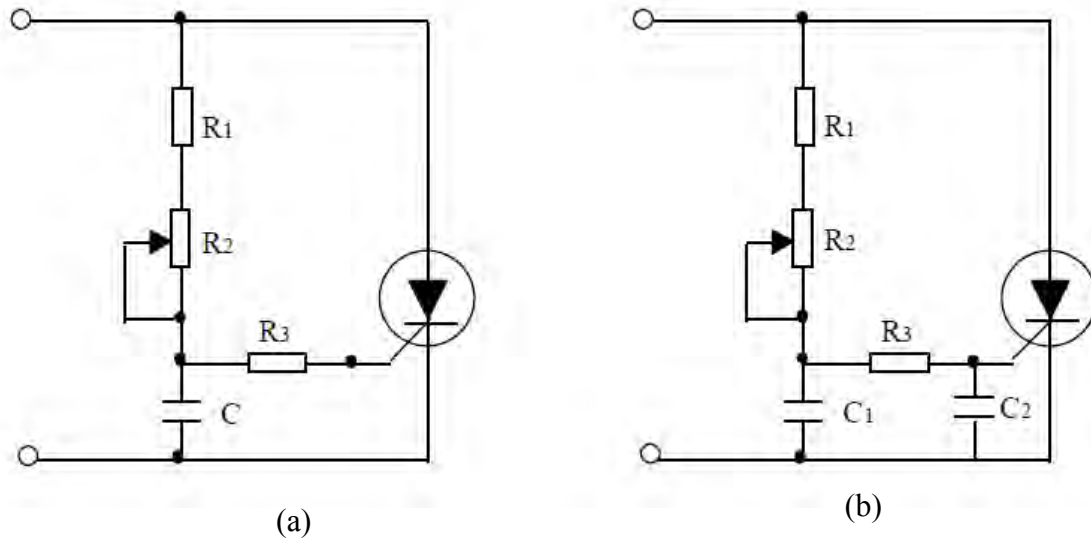
R = (R_1 + R_2) = $\frac{162\ V}{15mA} = 10{,}8\ k\Omega$

R_2 = 10,8 k - 3 k = 7,8 k ohm

jadi potensiometer R_2 diatur pada harga 7,8 k ohm.

1.3.2 Rangkaian Picu Penggeser Fasa (*phasa shift gate controll*)

Untuk mendapatkan pengontrolan yang lebih baik, sedapat mungkin daerah pengaturan sudut konduk/picu diperlebar sampai 180°.Maksud tersebut dapat diatasi dengan rangkaian RC yang merupakan rangkaian penggeser phasa, sebagaimana diperlihatkan pada gambar 1.11.

Pada rangkaian ini terjadi pergeseran phasa antara gelombang tegangan U_{AK} dengan arus picu I_G, besarnya pergeseran tersebut dapat diatur melalui R_2, dengan cara ini secara teoritis sudut konduk/picu thyristor dapat diatur dari 0°sampai 180°.

Gambar 1.11Rangkaian RC untuk memperlebar sudut picu

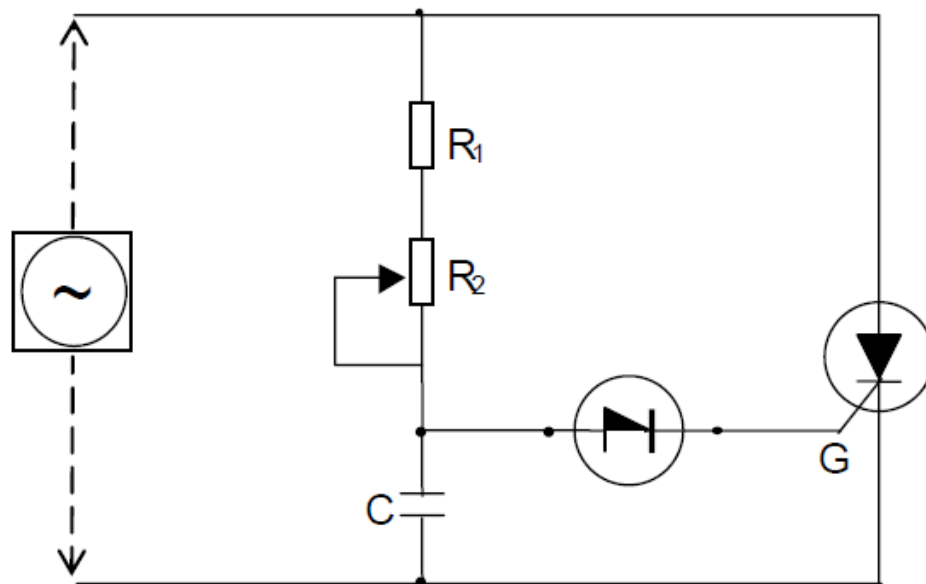
1.3.3 Rangkaian picu menggunakan Komponen Break Over

Rangkaian picu menurut 1.9, 1.10 dan 1.11 mempunyai kelemahan-kelemahan diantaranya terhadap :

a. Pengaruh temperatur : Kenyataannya bila suhu thyristor berubah (semakin panas bila dioperasikan) maka besarnya sinyal picu yang diperlukan untuk I_G berubah pula. Dengan demikian pada suatu pengaturan picu tertentu, bila suhu physic thyristor berubah maka perolehan sudut konduk/picu berubah pula.

b. Karakteristik thyristor : Thyristor mempunyai karakteristik yang berbeda antara satu dengan yang lainnya, bila terjadi penggantian thyristor (meskipun tipe sama) pada suatu pengaturan picu tertentu, maka sudut konduk/sudut picu yang terjadi belum tentu sama.

Kelemahan ini dapat diatasi dengan memasang komponen break over pada elektroda gate : SCR menggunakan dioda 4 lapis dan triac menggunakan diac.
Dengan cara demikian, meskipun suhu thyristor berubah serta terjadi penggantian thyristor dengan tipe yang lain, maka pengaturan sudut konduk akan tetap sama, karena saat terjadinya arus picu tetap yaitu ditentukan dengan saat konduknya dioda 4 lapis atau diac (*komponen break over*).

Contoh rangkaian sederhananya diperlihatkan pada gambar 1.12.berikut:

Gambar 1.12Rangkaian picu SCR menggunakan dioda 4 lapis

Tugas 2.
Disamping ketiga rangkaian picu tersebut, sistem lain yang dapat memberikan pengaturan lebih baik diantaranya rangkaian picu menggunakan Relaxation Oscilator UJT dan rangkaian picu menggunakan sistem logik. Carilah rangkaian picu tersebut.!

1.3.4 Pengontrolan dc setengah gelombang

Pada dasarnya rangkaian ini menyerupai dengan rangkaian penyearah setengah gelombang, tetapi sebagai komponen penyearah menggunakan sebuah SCR. (contoh sebagaimana gambar 1.11 dan 1.12)

Sudut konduk SCR diatur melalui pengaturan sinyal picu, dengan demikian diperoleh output dengan harga tegangan sesuai dengan interval konduksi SCR, bila pada output dipasang beban maka disipasi daya pada beban akan sebanding pula dengan interval tegangan output yang dihasilkan, sudut konduk/picu dapat diatur dari 0_o sampai 180_o sehingga tegangan output yang dihasilkan dapat diatur dari 0 sampai ½ tegangan rata-rata (0 volt sampai ½ U_{avg}).

Apabila U_m adalah tegangan maksimum dari U_{AC}, maka tegangan keluaran rata-rata UDC adalah :

$$U_{DC} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_m \, \mathrm{Sin}\, \omega t \, d(\omega t) = \frac{Um}{2\pi}\left[-\mathrm{Cos}\,\omega t\right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{Um}{2\pi}(1 + \mathrm{Cos}\,\alpha)$$

U_{DC} dapat diatur dari 0 volt sampai dengan $\frac{Um}{\pi}$volt

D. TUGAS PRAKTIKUM

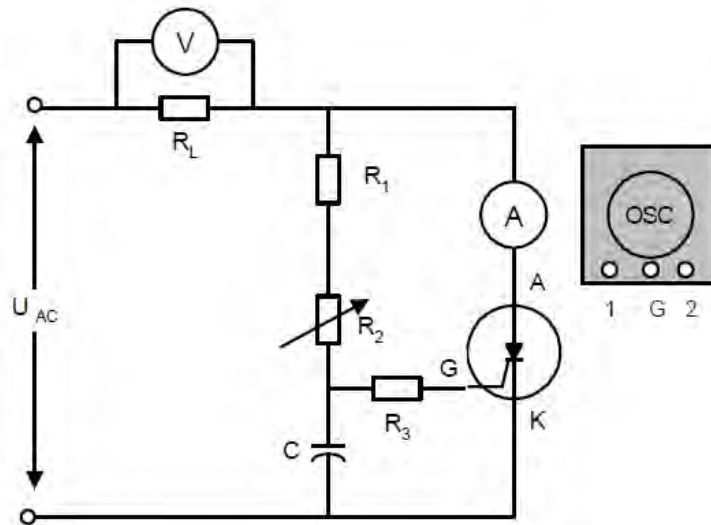
PRAKTIK 1 : SCR
Pengontrolan DC Setengah Gelombang

Tujuan :

1. Menguji bentuk gelombang tegangan anoda (U_{AK} = sudut α), tegangan beban (U_{RL} = sudut θ) dan sinyal picu (I_G).

2. Membuktikan terjadinya pengaturan sudut konduksi = $sudut\ \theta$, sudut picu = sudut α , dan hubungan antara sudut konduksi atau picu dengan harga tegangan output (U_{dc}) dan disipasi daya output (P_{dc}).

Data Percobaan :

1. Rangkaian Percobaan

Gambar 1.13Rangkaian percobaan pengontrol dc setengah gelombang

Alat dan Bahan yang digunakan:

R_1 = ± 10 k ohm

R_2 = ±100 k ohm, potensiometer

R_3 = ±1 k ohm

C = 0,1 mikro Farad

R_L = 100 ohm, 100 watt atau lampu pijar 100 watt

SCR = TIC 106 atau yang sejenis, Dioda 4 lapis = 1N5793

A = Ampere meter dc b.u 1A

Osc = Osiloskop, dihubungkan ke sumber melalui trafo isolasi

U_{AC} = 100 volt dan V = volt meter DC

Langkah Kerja :

1. Buatlah rangkaian percobaan sebagaimana gambar rangkaian !
2. Pasanglah probe osiloskop pada R_L dan SCR untuk mengamati bentuk tegangan U_{RL} = sudut θ dan tegangan U_{AK} = sudut α (untuk osiloskop 2 kanal harus menggunakan hubungan common ground) !
3. Hidupkan rangkaian, aturlah potentiometer R_2 perlahan-lahan sambil mengamati bentuk tegangan U_{RL} dan U_{AK} pada osiloskop serta besarnya arus anoda (I_A) pada A meter !

Buatlah data tentang hubungan antara sudut konduk (U_{RL}), sudut picu (U_{AK}) dan arus anoda I_A, tulislah hasilnya dalam tabel !

4. Selidikilah hubungan antara nilai tahanan (posisi potensiometer) dengan sudut konduk dan sudut picu SCR serta catatlah sudut konduk terkecil dan terbesar !
5. Aturlah R_2 untuk mendapatkan sudut konduk tertentu (misal : 60^{o}).

Gambarlah bentuk arus gate = I_G (dengan cara melihat display tegangan U_{R3}), sudut picu = U_{AK} dan sudut konduk = U_{RL}.

Selanjutnya panaskan SCR (dengan mendekatkan solder), selidiki pengaruh panas tersebut terhadap sudut konduk !

6. Pasanglah Dioda 4 lapis antara antara R_3 dengan gate, selanjutnya ulangi lagi percobaan step 5 !
7. Buatlah kesimpulan-kesimpulan dari hasil pengamatan !

Hasil Percobaan :

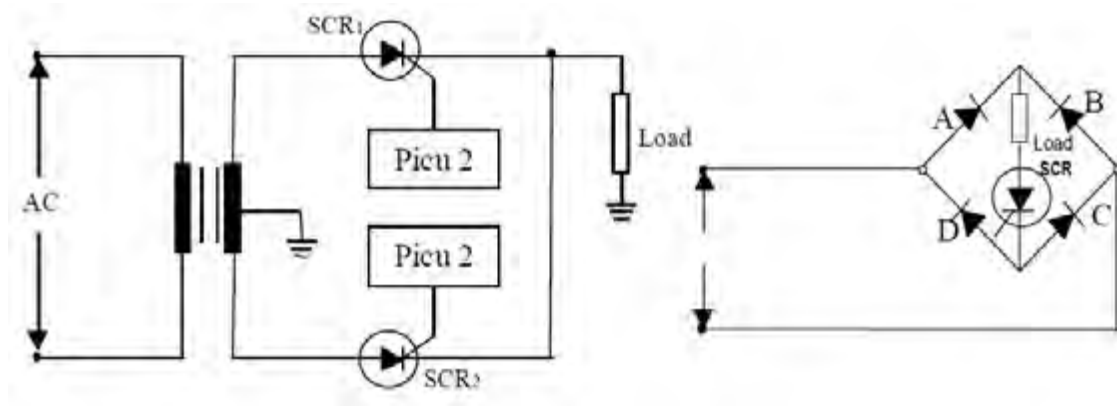
Bentuk tegangan URL dan UAK

Tabel data :

No.	$\angle\alpha$ (...^{0})	$\angle\theta$ (...^{0})	U_{RL} (volt)	I_{RL} (ampere)	P (watt)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Kesimpulan:

1.3.5 Pengontrolan dc Gelombang Penuh.

Untuk menghasilkan pengontrolan dc gelombang penuh blok diagram rangkaiannya seperti gambar 1.14.

Gambar 1.14Rangkaian pengontrol dc gelombang penuh

Apabila Um adalah tegangan maksimum dari UAC, maka tegangan keluaran rata-rata UDC adalah :

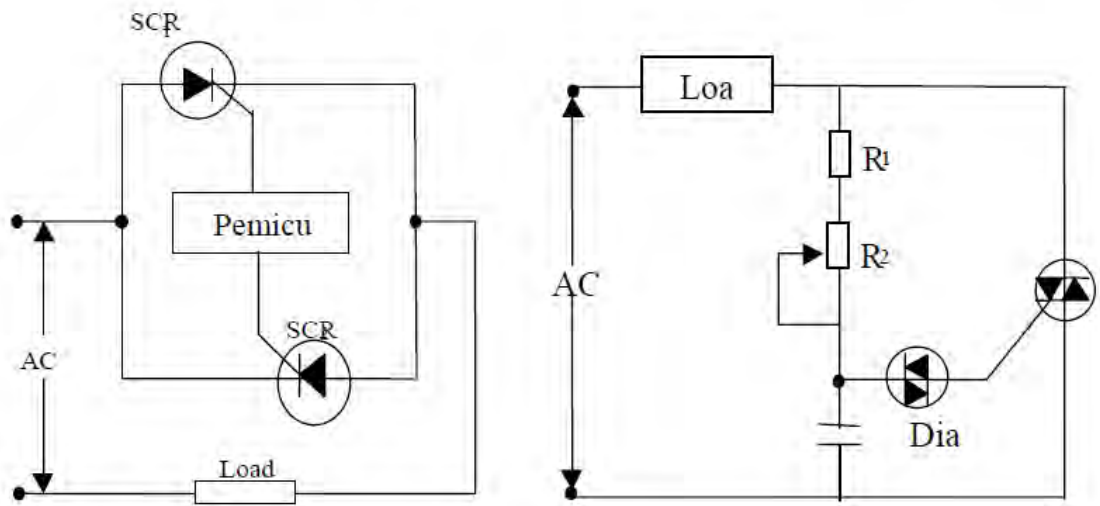
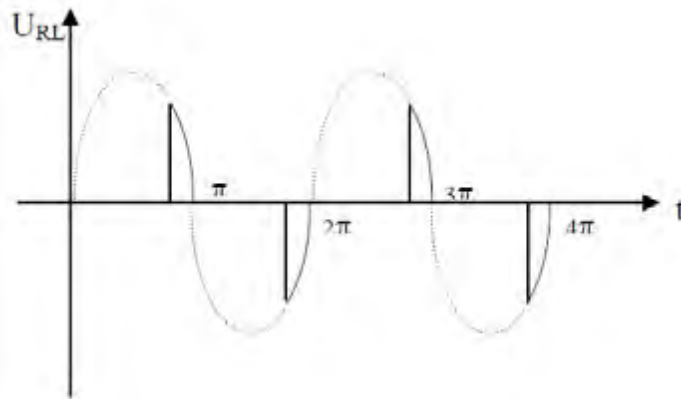
$$U_{DC} = \frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_m \operatorname{Sin} \omega t \, d(\omega t) = \frac{2Um}{2\pi}\left[-\operatorname{Cos}\omega t\right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{Um}{\pi}\left(1 + \operatorname{Cos}\alpha\right)$$

UDC dapat diatur dari 0 volt sampai dengan $\frac{2Um}{\pi}$ Volt

1.3.6 Pengontrolan ac

Pada dasarnya rangkaian pengontrol daya ac ini sama dengan rangkaian pengontrol dc, dalam hal ini pengaturan sudut konduk adalah untuk kedua arah (interval positip maupun interval negatip) yang umumnya selalu sama (simetris) biasanya disebut *bi-directional full wave controll*.

Gambar 1.15 dan 1.16.memperlihatkan blok diangram rangkaian *bidirectional full wave controll* (pengontrolan ac).

Gambar 1.15Blok diagram rangkaian pengontrol ac

Gambar 1.16Bentuk gelombang tegangan pada rangkaian pengontrolan ac

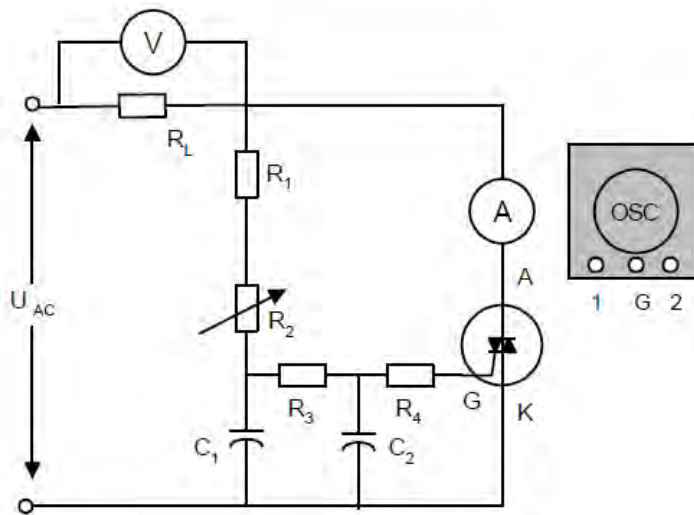
Sebagai komponen utama dapat menggunakan SCR maupun triac, pada umumnya lebih praktis menggunakan triac karena dapat konduksi untuk dua arah dan sebagai rangkaian pemicu digunakanlah diac.

Praktik 2 : Triac
Pengontrolan AC menggunakan Triac

Tujuan :

1. Menguji bentuk gelombang tegangan anoda (U_{AK} = Sudut α) dan tegangan beban (U_{RL} = sudut θ).
2. Membuktikan terjadinya pengaturan sudut konduksi = sudut θ, sudut picu = Sudut α) untuk dua arah (interval positip dan negatip) dan hubungan antara sudut konduk / picu dengan harga tegangan output (U_O) dan disipasi daya R_L (P_O).

Data percobaan :

1. Rangkaian percobaan

Gambar 1.17Rangkaian pengontrolan ac menggunakan triac

2. Alat-alat yang digunakan.

R_1 = ±10 k ohm ; R_2 = ± 200 k ohm, potentiometer

R_4 = ±1 k ohm ; R_3 = ± 33 k ohm dan ± 4,7 k ohm

C_1 = 0,22 mikro fahrad dan 0,10 mikro fahrad

C_2 = 0,22 mikro fahrad dan 0,02 mikro fahrad

R_L = 100 ohm/100 watt atau lampu pijar 100 watt

Triac = T 2302 atau yang sejenis (400 volt/3 ampere)

Diac = T 143 atau yang sejenis

A = ampere meter ac, b.u 1 ampere (sesuai beban).

Osc = Osiloskop dihubungkan ke sumber melalui trafo isolasi

U_{AC} = 100 volt dan V = volt meter AC

Langkah Kerja :

1. Buatlah rangkaian percobaan sebagaimana gambar rangkaian !
2. Pasanglah probe osiloskop pada R_L dan triac untuk mengamati bentuk tegangan U_{RL} = sudut θ dan tegangan U_{AK} = sudut α (untuk osiloskop 2 kanal harus menggunakan hubungan common ground) !
3. Hidupkan rangkaian, aturlah potentiometer R_2 perlahan-lahan sambil mengamati bentuk tegangan R_L, tegangan U_{AK} pada osiloskop dan besarnya arus anoda $I_A = I_L$ pada A-meter.
Buatlah data tentang hubungan antara sudut konduk (U_{RL}), sudut picu (U_{AK}) dan arus anoda (I_A), tulislah hasilnya pada tabel !
4. Selidikilah hubungan antara posisi potentiometer R_2 dengan sudut konduk/picu, serta perhatikan apakah sudut konduk pada interval positip sama dengan sudut interval negatip?
5. Aturlah R_2 untuk mendapatkan sudut konduk tertentu (misal 90°).
Pada keadaan demikian, gambarlah bentuk arus gate = I_G (dengan cara melihat display tegangan U_{R4}), sudut konduk dan sudut picu.
Selanjutnya panaskan triac (dengan mendekatkan solder), selidiki pengaruh panas terhadap sudut konduk tersebut.

6. Pasanglah diac antara R_4 dengan gate, dan gantilah komponen berikut : R_3 = 4,7 k ohm; C_1 = 0,1 mikro fahrad; C_2 = 0,02 mikro farad. Selanjutnya ulangilah langkah 4 !
7. Buatlah analisa dan kesimpulan dari pengamatan dan data anda !

Hasil Percobaan :

Bentuk tegangan U_{RL} dan U_{AK}

Tabel data :

No.	$\angle\alpha$ (...^{0})	$\angle\theta$ (...^{0})	U_{RL} (volt)	I_{RL} (ampere)	P (watt)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

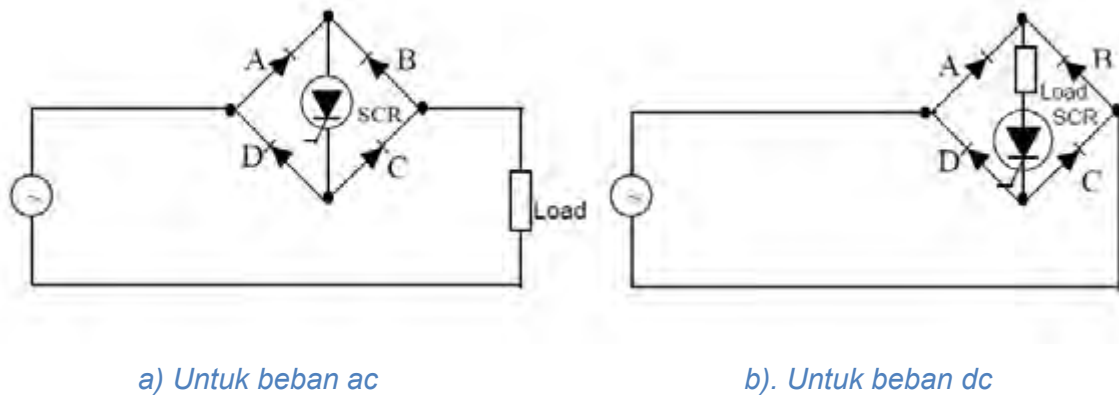
Kesimpulan:

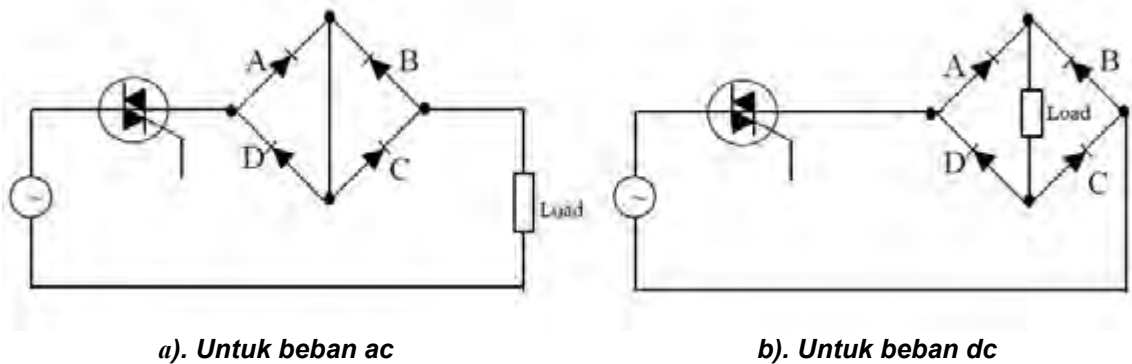
1.3.7 Pengontrolan dc - ac gelombang penuh

Pada dasarnya rangkaian ini merupakan rangkaian pengontrol dc gelombang penuh disebut pengontrol dc-ac karena dapat digunakan untuk mengendalikan beban ac maupun beban dc, yang selanjutnya biasa dinamakan "*Uni-bi directional full wave controll* ".

Perhatikan blok diagram rangkaian pada gambar 1.18 dan 1.19 !

Rangkaian tersebut dapat dibangun terdiri atas sebuah penyearah bridge dengan kontrol SCR atau sebuah penyearah bridge dengan kontrol triac.

a) Untuk beban ac *b). Untuk beban dc*

Gambar 1.18Pengontrolan ac/dc dengan triac

a). Untuk beban ac ***b). Untuk beban dc***

Gambar 1.19Pengontrolan ac/dc dengan triac

Untuk pemakaian beban ac sebagaimana gambar 1.18a.dan1.19a. penyearah bridge tidak dibebani (dihubung singkat), beban dipasang di luar bridge.

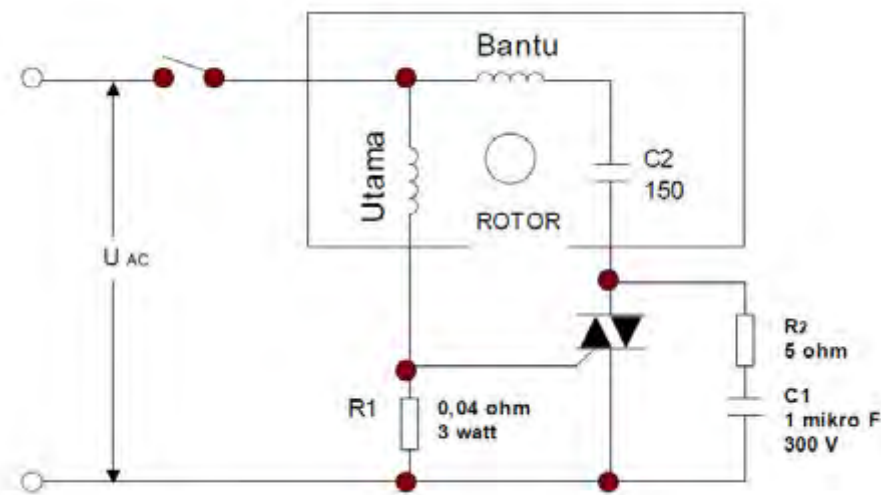
Untuk pemakaian beban dc sebagaimana gambar 1.18a.dan1.19b, beban dipasang di dalam jembatan (penyearah bridge) dan rangkaian di luar bridge tidak dibebani.

Tugas 3:

Buatlah suatu percobaan sendiri dengan menggunakan petunjuk seperti percobaan-percobaan sebelumnya tersebut. Misalnya, kerjakan lagi percobaan pada rangkaian gambar 1.18 dan 1.19, sebagai beban gunakanlah motor Universal, pasanglah motor di luar bridge (merupakan beban ac) dan di dalam bridge (sebagai beban dc).

1.3.8 Aplikasi saklar statis pada rangkaian pengendali

Saklar starting motor menggunakan saklar statis

Motor induksi satu phasa mempunyai kumparan bantu yang hanya diperlukan pada saat starting saja, sampai putaran mencapai harga tertentu kira-kira 75 % dari putaran nominal. Untuk pengontrolan ini diantaranya menggunakan saklar centrifugal, pengontrolan tersebut dapat digantikan dengan saklar statis menggunakan triac sebagaimana diperlihatkan pada gambar

Gambar 1.20 .Saklar starting motor menggunakan triac

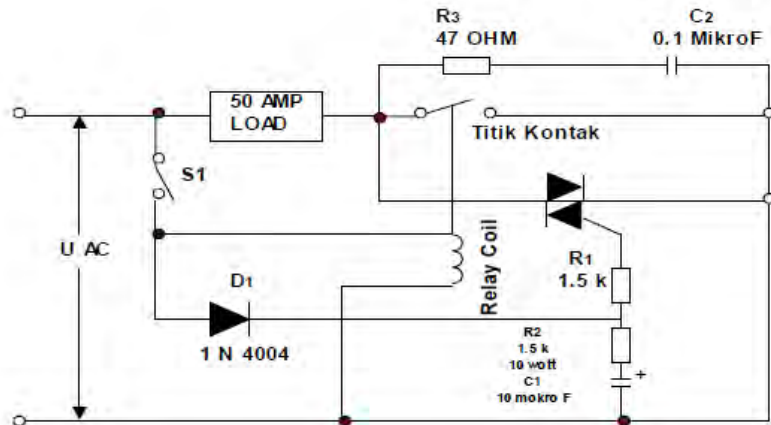
Ketika S_1 ditutup, arus mula mengalir melalui kumparan utama motor, arus mula ini sangat besar biasanya beberapa kali lipat dari arus pada saat bekerja (nominal). Karena arus mula tersebut tinggi maka tegangan jatuh pada R_1 (= U_{R1}) yang terpasang seri dengan kumparan utama cukup untuk memberikan sinyal picu pada gate G (triac), pada saat tersebut triac konduk (ON) dan kumparan bantu motor bekerja.

Dengan demikian kopel mula (start) motor tetap ada sebagaimana menggunakan saklar centrifugal dan motor mulai berputar.

Setelah rotor berputar arus yang mengalir pada kumparan utama menurun semakin kecil dan tegangan jatuh pada R_1 (=U_{R1}) juga semakin rendah, sehingga pada suatu putaran tertentu dengan harga arus kumparan utama tertentu maka tegangan jatuh pada R_1 (= U_{R1}) tidak mampu lagi memberikan sinyal picu yang diperlukan dan triac OFF, sehingga kumparan bantu motor terputus hubungannya dengan sumber setelah putaran mula jalan (± 75% nominal) dicapai seperti halnya yang terjadi pada saklar centrifugal. Sebaiknya R_1 menggunakan tahanan geser yang mempunyai harga tahanan rendah dengan kemampuan arus sesuai I nominal motor, dengan demikian kedudukan saat mana triac dikehendaki ON/OFF dapat diatur.Pada gambar rangkaian tersebut untuk motor 1/2 HP dapat digunakan R_1 = 0,05Ω/3 watt, rangkaian seri R_2 - C_2 berfungsi sebagai pengaman triac dari adanya tegangan spike yang terjadi akibat gejala peralihan (transcient).

1.3.9 Triac untuk pencegah bunga api (contact bounce) pada saklar

Masalah umum pada saklar yang kemampuan/kapasitas arusnya tinggi adalah terjadinya buga api (*contact bounce*) pada permukaan titik kontak (*contact point*), akibatnya terjadi percikan/panas, erosi maupun tekanan mekanis pada saat peralihan ON / OFF.

Untuk mengatasi hal tersebut dapat kita manfaatkan saklar statis, dengan rangkaian sederhana yang diperlihatkan pada gambar 1.21

Gambar 1 .21Triac sebagai pencegah buga api pada titik kontak

Rangkaian tersebut dapat digunakan untuk mencegah *contact arcing* dengan kemampuan di atas 50 ampere. Relay bekerja pada umumnya terjadi selang/penundaan waktu antara saat tersambungnya kumparan pemagnit relay (pengunci) ke sumber dengan terhubungnya titik-titik kontak dalam orde waktu mili sekon (kira-kira 15 ms, untuk saklar sederhana mungkin lebih dari 15 ms). Sedangkan pada thyristor, setelah gate memperoleh sinyal picu maka anoda-katoda akan segera konduk hanya memerlukan waktu beberapa mikro detik (μs).

Pada rangkaian gambar 1.21 bila saklar S_1 ditutup gate mendapat picu melalui D, selanjutnya hanya dalam waktu beberapa mikro detik triac konduk, sehingga arus beban (I_L) akan mengalir melalui A ke K .

Hampir bersamaan dengan peristiwa tersebut saat S_1 ditutup kumparan pemagnet mengunci (tersambung dengan sumber), setelah terjadi peristiwa magnetisasi maka kontaktor relay akan ditarik selanjutnya kedua point kontak terhubung satu sama lain hal ini terjadi dalam tempo ± beberapa mikro detik.

Karena arus beban I_L sudah terlebih dulu melalui triac maka saat terjadi kontak antara titik kontak tersebut, maka tidak akan terjadi arching maupun contact bounce. Selanjutnya setelah titik kontak terhubung maka arus beban akan pindah mengalir melalui kontaktor karena tahanan kontaktor lebih kecil dari tahanan A-K triac, ingat

bahwa thyristor memerlukan U_H - ± 2 volt sehingga praktis triac tidak bekerja dalam arti tidak dilewati I_L.

Seandainya saat S_1 ditutup tegangan sumber sedang dalam interval negatip, maka triac akan tetap konduk mendahului kontaktor, karena untuk frekuensi sumber 50 Hz maka waktu untuk ½ periode hanya 10 ms, jadi walaupun A-K triac sudah tidak dilewati arus tetapi sebenarnya gate masih tetap mendapat sinyal picu, karena C_1 akan tetap menjaga tegangan picu, yaitu dari pengisian C_1 diinterval positip.

Ketika S_1 dibuka, hubungan gate terhadap sumber terputus tetapi C_1 menyimpan tegangan yang cukup untuk menjaga triac tetap konduk sampai pengosongan 5 T (T adalah time konstan).

T= (R1 + R2) . C detik

Sehingga pada sewaktu S**1** dibuka titik kontak-titik kontak relay terputus tanpa terjadi arching dan bounce, karena arus beban berpindah mengalir melalui A - K triac, setelah peristiwa pengosongan C1 (melalui R2 - R1 - gate) selesai, maka triac OFF dan beban benar-benar telah lepas dari tegangan sumber.

Jadi anoda-katoda yang dipasang paralel dengan kontak-kontak relay, akan lebih cepat (mendahului) konduk (ON) dari pada titik kontak tetapi akan lebih lambat terlepas (OFF) dari pada titik kontak.

Rangkaian seri R3 dan C2 yang dipasang paralel dengan triac merupakan pengaman dari akibat gejala peralihan dV/dt.

LATIHAN 1 :

SAKLAR STARTING MOTOR
MENGGUNAKAN SAKLAR STATIS

I TUJUAN

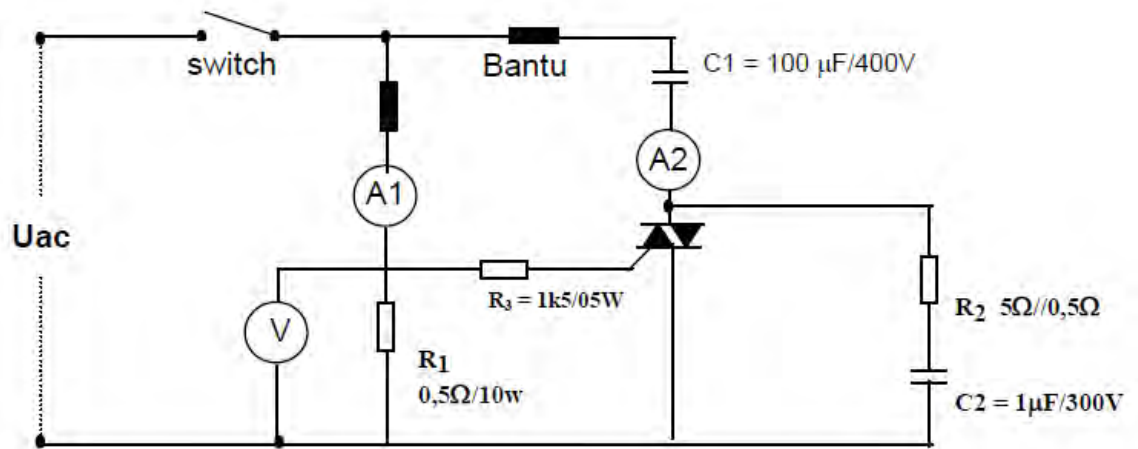
1. Agar dapat memilih komponen untuk saklar starting motor 1 phasa menggunakan saklar statis.
2. Agar dapat melaksanakan percobaan sesuai rangkaian percobaan

II. DATA PERCOBAAN.

1. ALAT DAN BAHAN

1). Saklar	0.20 A	1	buah
2). Motor 1 ph	22V/1.1 kw	1	buah
3). Triac	C 220 D	1	buah
4). Resistor	0,5 □/10 w	1	buah
5). Resistor	1.5 kfl/0,5w	1	buah
6). Resistor	5□/0,5w	1	buah
7). Capasitor	1jtF.300V	1	buah
8). Volt meter	0 - 300V	1	buah
9). Ampermeter	0 - 10 A	2	buah

10). Jumper secukupnya
11). Sumber tegangan 220 Volt ac
12). Tacho meter 1 buah

2. RANGKAIAN PERCOBAAN

Gambar 1.22

3. HAL YANG PERLU DIPERHATIKAN.

1). Gunakan komponen sesuai pada data rangkaian
2). Perhatikan batas ukur dari alat ukur

III. LANGKAH KERJA

1. Siapkan alat dan bahan
2. Laksanakan pengawatan seperti pada gambar rangkaian
3. Periksa kembali rangkaian percobaan
4. Periksakan rangkaian percobaan pada Instruktor, sebelum dihubungkan ke sumber tegangan.
5. Hubungan rangkaian ke sumber tegangan
6. Hubungkan saklar S1
7. Catat penunjukkan Voltmeter, Amperemeter, Tachometer pada tabel.
8. Matikan sumber tegangan.

IV. TABEL PERCOBAAN DAN ANALISA DATA.

Motor	U_G (volt)	I_1 (Amp)	I_2 (Amp)	IG	N (rpm)
Star	**5 V**				
Normal	245 V				

IV. KESIMPULAN

Setelah motor mencapai putaran normal I6 sama dengan Nol CT6 = 0A). Sebab pada kondisi motor normal arus kumparan utama kecil (Nominal) sehingga tidak mampu menyulut Gate Triac sehingga Triac tidak konduk.

LATIHAN 2 :

TRIAC SEBAGAI PENCEGAH BUNGA API PADA TITIK KONTAK

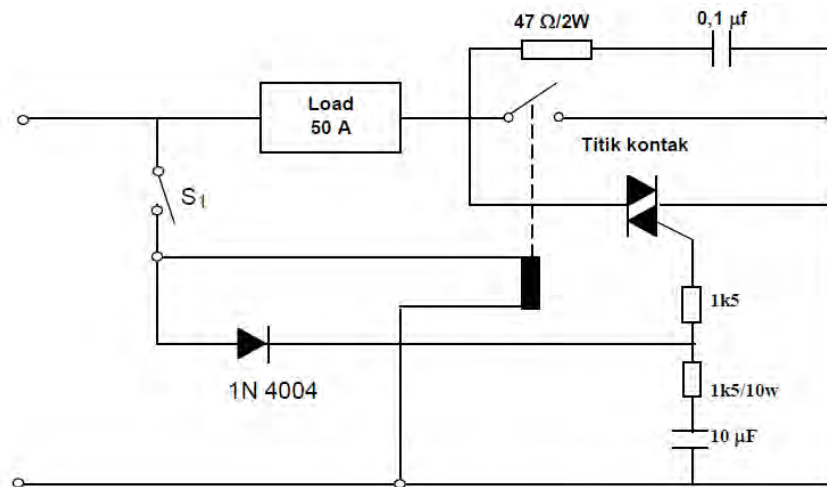
I. TUJUAN.

1. Mencoba bunga api saat ON. OFF pada titik kontak

II. DATA PERCOBAAN

1. ALAT DAN BAHAN PERCOBAAN

1. Kontaktor 1 buah
2. Triac TYPE C 22.0 D 1 buah
3. Saklar ON – OFF 1 buah
4. Resistor A 7 /2 w 1 buah
5. Resistor 1.5 k /0,5 w 2 buah
6. Capasitor 10 F 1 buah
7. Capasitor 0,1 F 1 buah
8. Beban (10 A) 1 buah
9. Multimeter 1 buah
10. Power Suply (sumber arus) 1 buah
11. Kabel penghubung 1 buah
12. Papan terminal 1 buah

2. GAMBAR RANGKAIAN

Gambar 1.23

3. HALYANG HARUS DIPERHATIKAN

- Yakinkan alat dan bahan masih baik
- Pergunakan alat dan bahan sesuai fungsinya

III. LANGKAH KERJA.

1. Menyiapkan alat dan bahan praktek
2. Merangkai komponen sesuai dengan gambar rangkaian
3. Yakinkan bahwa rangkaian sudah benar
4. Lapor pada instruktor
5. Memberi sumber pada rangkaian.
   - Tekan S_1

     Amati pada titik kontak kontaktor, ada / titik ada bunga api
   - Lepas / putus S1.

     Amati pada titik kontak kontator, ada / tidak ada bunga api
6. Lepas hubungan Gate

   - Tekan S_1

     Amati pada titik kontak kontaktor, ada / titik ada buga api

- Lepas / putus S1.

  Amati pada titik kontak kontaktor, ada/tidak ada bunga api

7. Percobaan selesai, lepas arus sumber pada rangkaian
8. Membongkar rangkaian dan mengembalikan alat dan bahan

IV. HASIL PERCOBAAN /ANALISA PERCOBAAN

1. Rangkaian yang menggunakan triac pada kontak kontaktor tidak terjadi percikan bunga api pada saat ON-OFF.

2. Rangkaian yangtidak menggunakan triac pada saat ON-OFF pada kontak kontaktor terjadi peprcikan bunga api.

V. KESIMPULAN

Untuk menghindari bunga api (contact bounce) pada titik kotak kontaktor dapat digunakan triac, sehingga kontaktor dapat digunakan lebih efisien.

1.4 DASAR-DASAR INVERTER

Pengaturan kecepatan motor induksi untuk tetap menghasilkan efisiensi yang tinggi dapat dilaksanakan dengan pengaturan tegangan dan pengaturan frekuensi secara bersama, rangkaian elektronika daya yang dapat memenuhi keperluan tersebut adalah rangkaian inverter, dengan memanfaatkan fungsi saklar statis untuk mengubah tegangan dc menjadi tegangan ac.

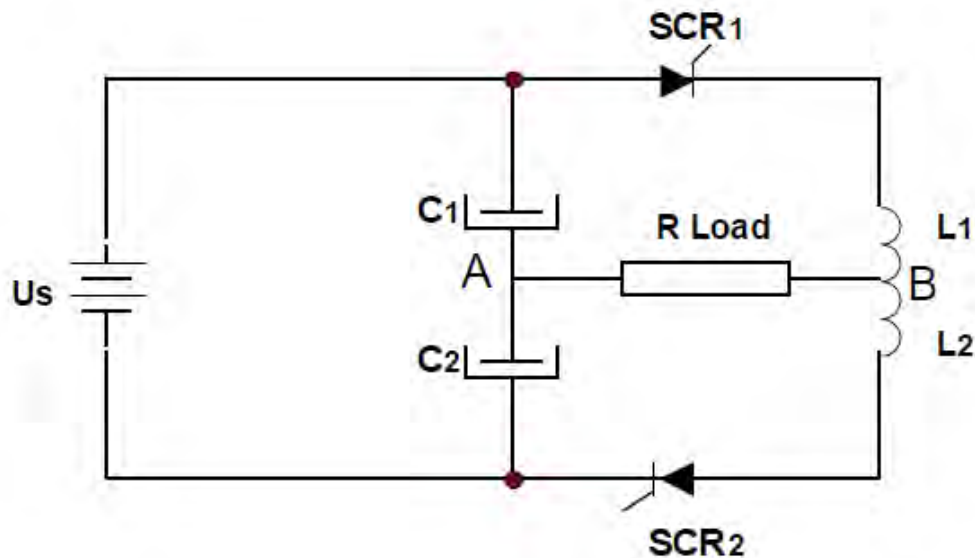
Komponen semi konduktor yang digunakan dalam rangkaian utama inverter adalah saklar statis menggunakan transistor atau thyristor yang pada umumnya SCR, walaupun didalam suatu rangkaian inverter kedua duanya digunakan tetapi salah satu diantaranya merupakan komponen utama.

Rangkaian inverter dengan daya besar biasanya menggunakan SCR (s.d. 1500 kVA) sedangkan untuk daya rendah dapat menggunakan transistor tenaga (s.d. 100 kVA). Keistimewaan sumber tegangan ac inverter adalah dalam kebutuhan tertentu

disamping tegangan kerjanya dapat diatur, juga frekuensinya (variable voltage variable frequency = VVVF).

1.4.1 Inverter SCR komutasi seri

Prinsip kerja rangkaian inverter SCR komutasi seri diperlihatkan sebagaimana gambar 1.24, dimana kapasitor C_1 dan C_2 sama besarnya dan induktor L mempunyai centre-tap (L_1 dan L_2). Resistor R_L merupakan beban yang akan dialiri arus ac inverter.

Cara kerja rangkaian ini dimulai dari kedua SCR kondisi OFF, selanjutnya sebagai berikut :

Gambar 1.24 Inverter SCR komutasi seri

Ketika SCR_1 - ON tegangan pada L_1 adalah ½U_S, selanjutnya melalui R_L arus akan mengalir dari B ke A yang merupakan arus pengosongan C_1 dan juga terjadi pengisian C_2 melalui R_L dan L_1. Arus akan mencapai harga maksimum ketika tegangan L_1 nol.

Dengan mengabaikan besarnya tahanan R_L, pada saat tersebut tegangan pada C_1 = 0 (tegangan pengosongan) dan tegangan pada C_2 (tegangan pengisian) menjadi sebesar U_S.

Ketika arus menjadi nol SCR_2 - ON, melalui R_L dan L_2 arus akan mengalir dari A ke B yang merupakan arus pengosongan C_2 dengan tegangan yang lebih tinggi dari keadaan pertama. Induktor L yang terdiri atas L_1 dan L_2 merupakan auto-transformator, sehingga pada saat L_2 mengalirkan arus pengosongan C_2, pada L_1 terjadi tegangan induksi yang sama dengan tegangan L_2, dengan demikian SCR_1 memperoleh bias reverse dari L_1 maka dengan cepat kondisi SCR_1 menjadi OFF saat peristiwa ini berlangsung, juga terjadi pengisian kapasitor C_1 melalui R_L dan L_2.

Berikutnya SCR_1 - ON dan SCR_2 - OFF, dan seterusnya kedua SCR ON/OFF bergantian, dengan demikian lengkaplah terjadi suatu periode arus secara kontinyu pada R_L adalah ac inverter yang merupakan pengosongan C_1 dan C_2 secara bergantian.

Tegangan rata-rata pada C1 dan C2 adalah ½U_S, tetapi tegangan puncaknya semakin naik sampai tercapai tegangan puncak perioda positip sama dengan periode negatip.

Besar kecilnya tahanan beban R_L menentukan kapasitas tegangan kapasitor.

Perhitungan pendekatan adalah :

$$U_c \ puncak = \frac{Us}{2} x \frac{(1+e^{-\frac{\pi}{2Q}})}{(1-e^{-\frac{\pi}{2Q}})}$$

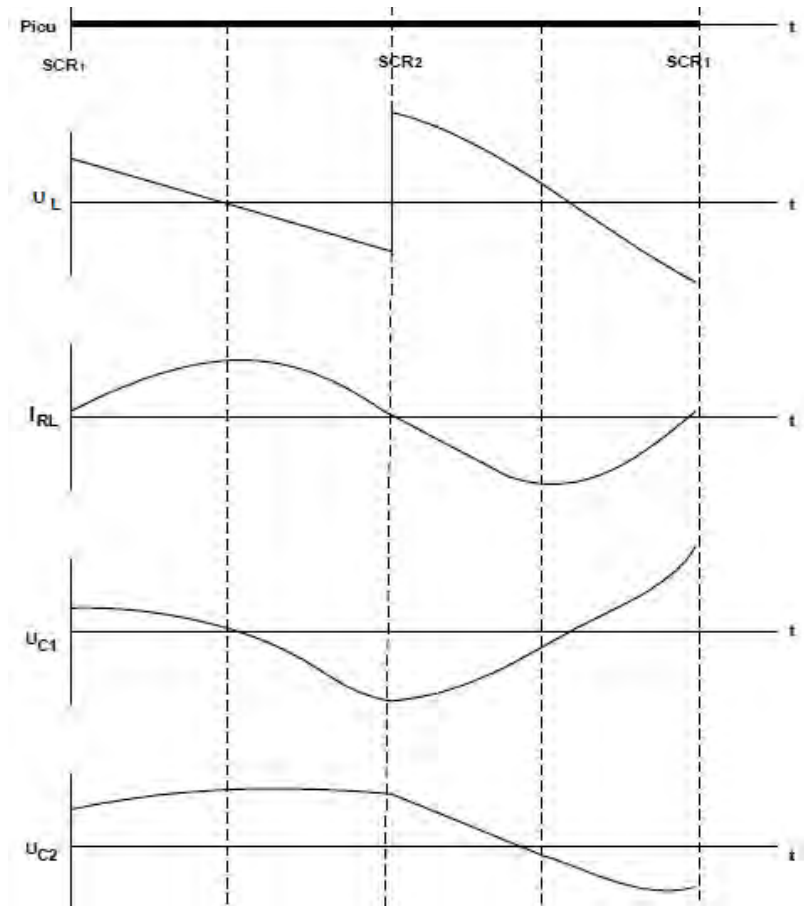
$$\textbf{dimana} : Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{4C}}}{R} \geq ½$$

$$C = C_1 + C_2$$

R dalam satuan Ω, L dalam satuan μH, dan C dalam μF.

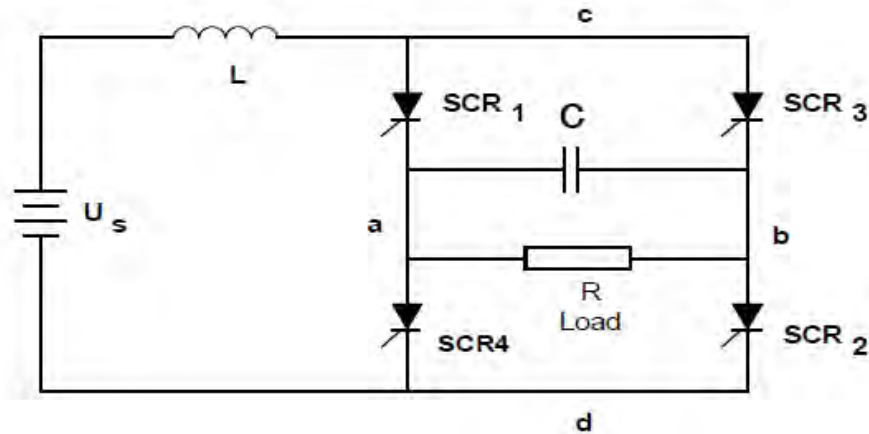
Rangakaian SCR inverter komutasi seri tersebut hanya dapat dikontrol melalui gate SCR_1 dan dapat dioperasikan dengan baik hanya pada frekuensi tertentu, untuk mengoperasikan di bawah atau di atas harga resonansi tidak mungkin dapat dilaksanakan.

Perhitungan pendekatan frekuensi ac inverter :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{LC}{4}}}$$

Gambar 1.25 Bentuk gelombang tegangan dan arus

1.4.2 Inverter SCR komutasi parallel

Prinsip kerja rangkaian SCR inverter komutasi paralel diperlihatkan sebagai gambar 1.26, dimana pasangan SCR1 dan SCR2 di picu bergantian dengan pasangan SCR3

dan SCR4 untuk menghasilkan arus bolak - balik yang mengalir pada tahanan beban (R**L**).

Gambar 1.26 SCR inverter komutasi parallel

Perhatikan gambar gelombang tegangan, pada gambar 1.27 :

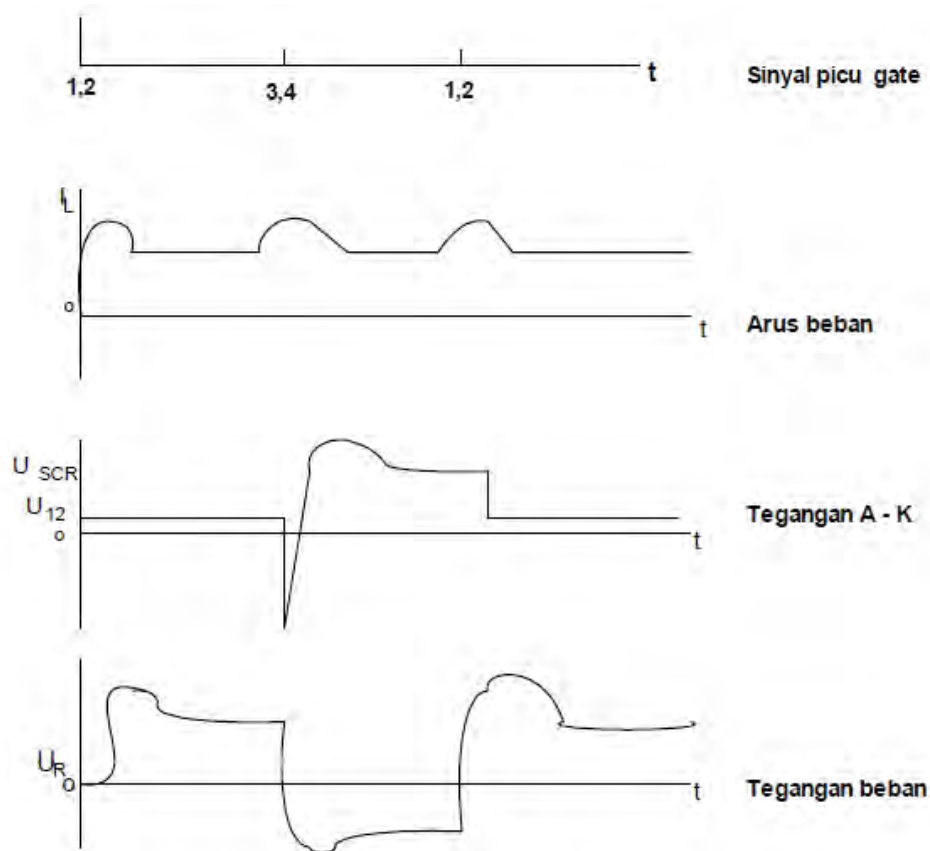
Tegangan pada SCR_1 dan SCR_2 (=U_{AK}) adalah U_{12} merupakan tegangan setengah perioda positip dengan arus mengalir dari SCR_1 melalui R terus ke SCR_2, sehingga tegangan pada R_L = U_R dinyatakan sebagai perioda positip, yaitu untuk a positip dan b negatip.

Jadi ketika SCR_1 dan SCR_2 ON (picu 1, 2), tegangan sumber U_S akan mengalirkan arus melalui loop L -→ SCR_1 -→ (a - b) -→ SCR_2.

Antara a dan b disamping merupakan tegangan supply bagi R_L juga terjadi pengisian kapasitor C. Pada L mengalir arus konstan, dengan mengabaikan U_H SCR, besarnya arus secara pendekatan = $\frac{Us}{RL}$.

Pada loop a - c - b arus melalui SCR_1 merupakan reverse bias selanjutnya membuat SCR_1 - OFF, pada loop a - d - b arus pengosongan melalui SCR_2 merupakan reverse bias pula selanjutnya membuat SCR_2 - OFF.

Tegangan sumber U_S akan mengalirkan arus dengan berpindah loop, yaitu melalui loop L -> SCR_3 -> (b-a) -> SCR_4.

Dengan demikian maka : tegangan pada R_L = U_R merupakan perioda negatip dimana a negatip dan b positip. Antara b dengan a disamping merupakan tegangan supply bagi R_L juga terjadi pengisian kapasitor C dengan polaritas kebalikan dari semula.

Gambar 1.27 Bentuk -bentuk gelombang tegangan dan arus

Demikianlah terjadi satu perioda penuh tegangan ac inverter gelombang kotak (*square wave*), dan seterusnya dengan memberikan picu SCR_1 dan SCR_2 bergantian dengan SCR_3 dan SCR_4.

Pada saat komutasi, tegangan U_R untuk waktu yang relative singkat (orde s) tetap dalam perioda positip karena adanya muatan C, keadaan ini berlangsung sampai arus yang melalui SCR_3 dan SCR_4 mengisi kondensator dengan polaritas berkebalikan dari semula. Pada keadaan ini pula U_{12} berupa tegangan tegangan *spike negatip* yang

merupakan arus pengosongan dan sebagai tegangan untuk membloking SCR_1 dan SCR_2 sehingga menjadi OFF. Maka ketika U_R beralih menjadi perioda negatif, U_{12} kembali positip seharga U_S, karena SCR_1 dan SCR_2 kondisi OFF.

Dalam praktek perhitungan pendekatan yang digunakan adalah :

Pertama, menentukan tegangan dan tahanan beban R_L, selanjutnya memilih SCR dengan *rating power* yang sesuai serta rangkaian picu disesuaikan dengan frekuensi output yang diperlukan.

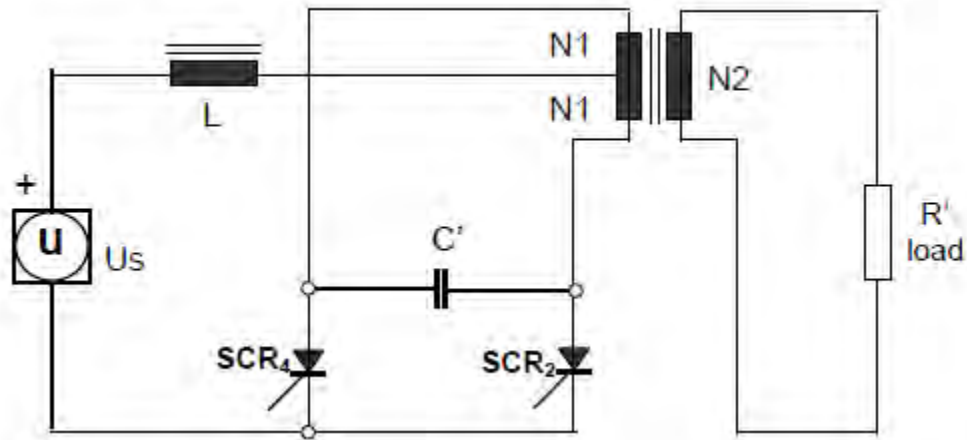
Selanjutnya, kapasitor komutasi dan induktor.

$$C = \frac{2\,t\,OFF}{R} :$$ RC time konstan = 2 t OFF

t OFF adalah trun OFF

RC time constant = RL time constant

$$\frac{L}{R} = R.C, \text{ maka : } L = CR^2$$

Rangkaian SCR inverter komutasi paralel tersebut di atas hanya akan menghasilkan tegangan output atau hanya bekerja bila beban RL dipasang, selanjutnya dengan cara rangkaian lain yaitu menganti RL dengan transformator maka tegangan output dapat tetap dihasilkan walaupun beban tidak terpasang, rangkaian tetap bekerja dalam keadaan tanpa beban. Perhatikan gambar 1.28 !

Gambar 1.28 SCR Inverter Komutasi Paralel menggunakan trafo sentertap.

Bila trafo pengganti RL adalah trafo yang mempunyai sentertap pada kumparan primer, maka inverter cukup menggunakan dua buah SCR. Seperti pada gambar maka SCR_1 dan SCR_3 tidak digunakan lagi.

Cobalah menganalisa prinsip kerja rangkaian tersebut! Dan perhitungan pendekatan yang digunakan adalah :

$$C' = \frac{1}{4}C \qquad\qquad R' = \frac{1}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2} x\ R$$

Dimana : C dan R adalah hasil perhitungan sebagaimana rangkaian dasar pada gambar 1.27.

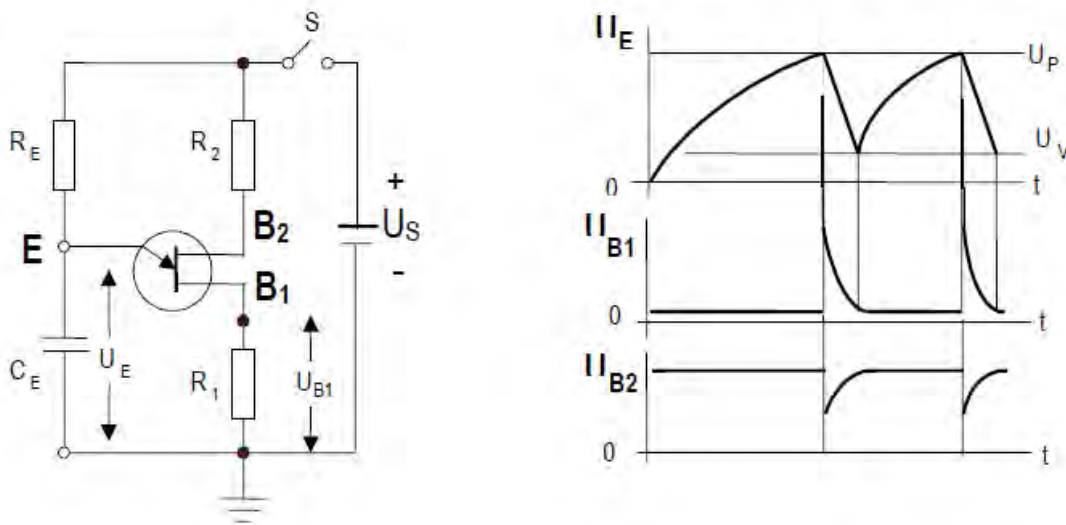
E. PROJECT WORK

Tujuan Kegiatan Pembelajaran

Siswa dapat menjelaskan pengertian sudut konduk dan sudut picu, membedakan prinsip operasi jenis-jenis rangkaian picu, mengimplementasikan thyristor pada rangkaian pengendali daya ac dan dc.

.

1. RELAXATION OSCILATOR UJT (RO UJT)

Gambar 1.20 memperlihatkan UJT sebagai rangkaian relaxation oscilator, yang dapat digunakan sebagai pemicu (trigger) gate suatu thyristor/SCR.

Gambar 1.20 Relaxation Oscilator UJT

Prinsip kerja rangkaian RO-UJT sebagai berikut :

Bila S_1 ditutup maka sumber U_S melayani rangkaian tersebut, terjadilah pengisian kapasitor C_E secara eksponensial melalui tahanan R_E sampai mencapai tegangan U_P. Selanjutnya tegangan C_E (=U_{CE}) berfungsi sebagai tegangan bias emitor (=U_E), setelah U_{CE} mencapai Up maka UJT akan konduk (ON) dan tahanan dalam $r_{E\text{-}B1}$ akan menurun cepat (sebagai tahanan junction E-B_1 forward). Hal demikian menyebabkan terjadinya pulsa tajam pada B_1 akibat arus konduksi I_E mengalirdari E ke B_1 dan sekaligus merupakan arus pengosongan dari kapasitor C_E.Dengan demikian

tegangan U_{CE} (=U_E) jatuh secara tajam, sehingga titik V (valley point) tidak terpenuhi dan UJT menjadi cut-off.

Siklus peristiwa tersebut akan berulang secara kontinyu, dengan persyaratan $I_P<I_E< I_V$ sebagaimana pada gambar 1.20.

Output RO-UJT sebagaimana gambar 1.20 (kanan) adalah :

- Tegangan emitor (= U_E) merupakan gelombang tegangan gigi gergaji (*saw tooth wave form*),
- Tegangan B_1 (= U_{B1}) berbentuk gelombang tegangan pulsa tajam positip (*spike voltage positive*) pada R_1,
- Tegangan B_2 (= U_{B2}) berbentuk gelombang tegangan pulsa tajam negatip (*spike voltage negative*).

Frekuensi osilator ini ditentukan oleh konstanta waktu (*time constant*) dari RE.CE dan karakteristik UJT itu sendiri. Menurut Paul B. Z.bar, ―*Industrial Electronics, A Text – Lab Manual* ", untuk R1 = 100 ohm maka satu periode frekuensi dari RO-UJT (TRO-UJT) dapat ditentukan dengan rumus pedekatan, sebagai berikut :

$$T = \frac{1}{f} = R_E . C_E . \ell n \frac{1}{1-\eta} \quad \text{[III.1]}$$

Untuk η = ± 0,63 maka TRO-UJT = T transien kapasitor = R**E**.C**E** detik.

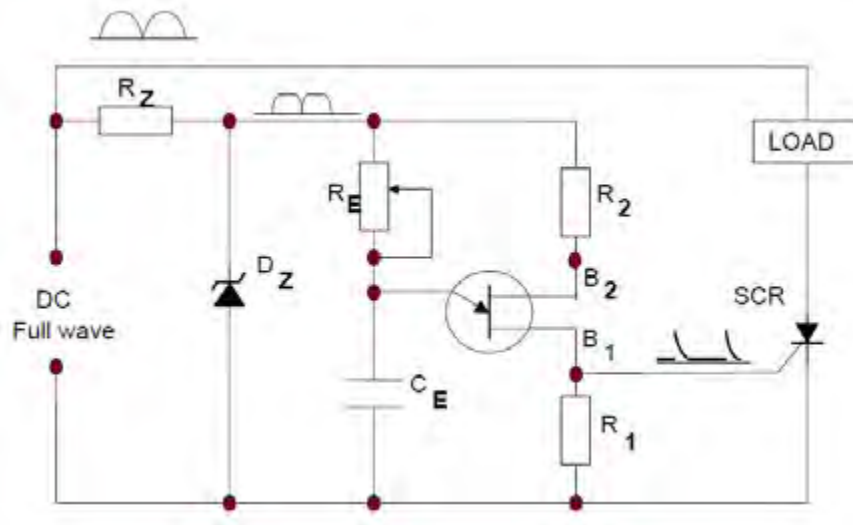
$$f_{RO.UJT} = 1/T = \frac{1}{R_E . C_E} \quad \text{[III.2]}$$

Untuk menjaga stabilitas operasional RO-UJT dan mengoptimalkan hasil pulsa positip (*spike voltage positive*), maka nilai tahanan R1 < R2 << rBB, dimana : R1 = ± 100 Ω , R2 = ±500 Ω, dan rBB pada umumnya ±8 kΩ, dengan demikian harga Up menurut persamaan [II.13] secara praktis adalah η Us.

Berdasarkan gambar II.14 Karakteristik Konduktivitas UJT, persyaratan agar rangkaian UJT dapat berosilasi adalah $I_P < I_E < I_V$, artinya nilai R_E maksimum dan R_E minimum adalah :

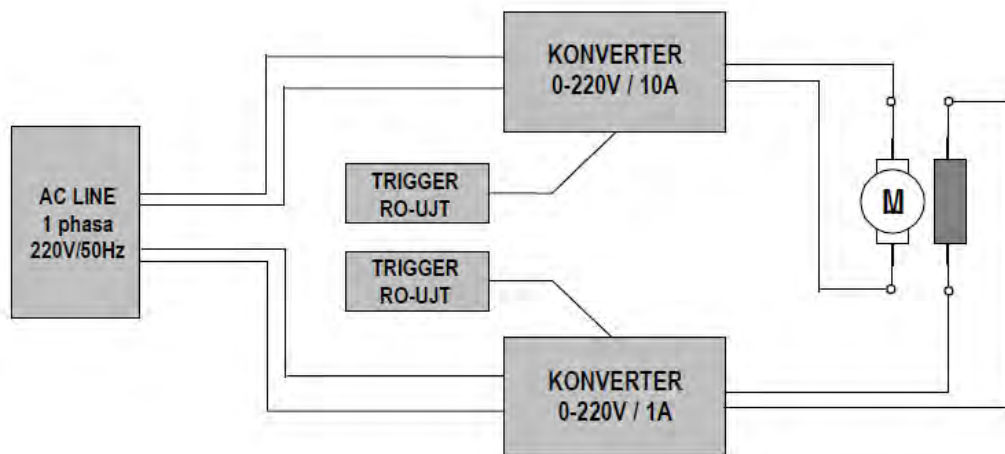
$$R_E\,mak = \frac{Us - Up}{Ip} \quad \text{-------------------------} \quad [III.3]$$

$$R_E\,min = \frac{Us - Uv}{Iv} \quad \text{-------------------------} \quad [III.4]$$

Gambar 1.21 di halaman berikut ini memperlihatkan contoh penggunaan rangkaian RO-UJT sebagai pengontrol thyristor / SCR.

Gambar 1.21 Pengontrolan SCR menggunakan RO-UJT

2. Rancangan Operasional Kerja Rangkaian

Pesawat Pengatur Kecepatan Putaran Motor Arus Searah Penguatan Terpisah menggunakan Semi-konverter Thyristor Satu Phasa ini dirancang untuk mengoperasikan Motor DC tegangan kerja 220 V / 1,5 kW, dengan arus penguatan medan maksimum 0,8 A.

Blok diagram kerja rangkaian pesawat ditunjukkan sebagaimana gambar 1.22, sedangkan rancangan rangkaian dan operasional kerja masing-masing unit / blokakan dibahas pada sub-bab selanjutnya.

Gambar 1 .22 Blok Diagram Pengendali Motor DC Penguat Terpisah.

Dalam rangkaian ini, baik tegangan jangkar maupun tegangan (arus) penguatan medan magnet disuplai oleh konverter yang dikendalikan melalui rangkaian pemicu (pen-trigger).

2. Kegiatan Belajar 2:

Dasar-dasar Variabel Speed Drive (VSD)

Indikator Keberhasilan:

Setelah menyelesaikan kegiatan belajar ini, diharapkan siswa mampu:

- Mendeskripsikan dasar-dasar VSD.
- Mendeskripsikan karakteristik dan prinsip kerja komponen-komponen elektronika daya dengan benar sesuai spesifikasi.
- Mendeskripsikan tentang kelistrikan VSD.
- Menjelaskan karakteristik dan prinsip kerja penyearah elektronika daya dengan benar sesuai spesifikasi.
- *Menjelaskan karakteristik dan prinsip kerja inverter gate-commtated (konverter AC/DC) dengan benar sesuai spesifikasi.*

A. URAIAN MATERI

2.1 Kebutuhan untuk VSDs

Motor berkecepatan tetap dan motor dua kecepatan telah dibahas dalam bab-bab sebelumnya. Berbagai aplikasi industri memerlukan kontrol gerak mesin dengan bantuan motor-motor seperti itu.VSDs memberi batasan kontrol kontinu atas kecepatan mesin.

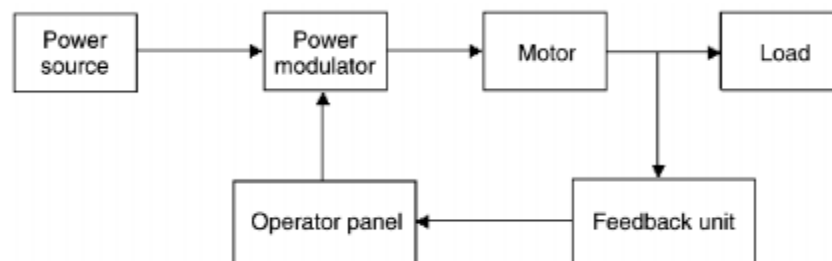
Beberapa aplikasi, seperti pabrik kertas, *rolling mill*, pompa, dan alat-alat mesin tidak dapat berjalan tanpa VSDs ini sedangkan yang lainnya, seperti pompa sentrifugal, bisa mendapat manfaat dari penghematan energi. Umumnya VSDs digunakan untuk melakukan berikut ini:

- Menyesuaikan kecepatan drive dengan keperluan kecepatan proses
- Menyesuaikan torque (kopel/torsi) drive dengan keperluan kopel proses
- Menghemat energi dan meningkatkan efisiensi.

2.2 VSD Dasar

VSD elektrik dasar terdiri dari sebuah motor, unit kontrol drive, unit sensing, dan sebuah input operator.

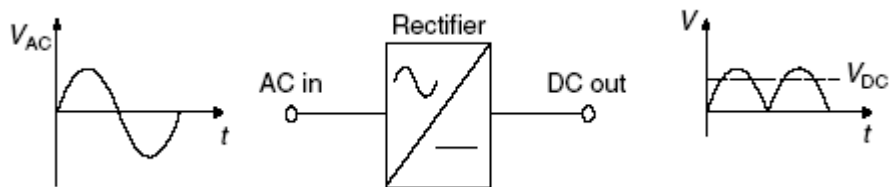
Diagram blok dasar dari sebuah drive elektrik berkecepatan variabel ditunjukkan dalam Gambar 2.1.

Unit kontrol drive adalah sebuah perangkat yang memodulasi energi dari sumber ke motor . Melalui panel operator, seseorang dapat meningkatkan atau menurunkan *set point* drive. Sebuah unit feedback memberi feedback kecepatan aktual pada drive. Kemudian modulator power atau unit kontrol drive mengontrol kecepatan, kopel, dan power, bersama dengan arah motor dan mesin. Modulator power bisa digunakan sebagai satu alat, untuk pengontrolan motor.Ia mungkin harus digunakan dalam tipe gabungan untuk tipe-tipe aplikasi lain tertentu. Berikut ini adalah tipe-tipe modulator konverter bersama dengan uraian singkat dari masing-masing.

Gambar 2.1 *Diagram blok VSD*

2.2.1 Konverter

Ini mengkonversi satu bentuk energi ke bentuk lainnya, yang cocok untuk sebuah motor.Mereka dapat didefinisikan sebagai perakitan komponen-komponen elektronika daya, yang mengkonversi satu atau lebih karakteristik dari sebuah sistem tenaga listrik. Untuk pengontrolan motor DC, tegangan DC variabel diperlukan. Untuk motor AC, sebuah frekuensi tetap, tegangan AC variabel, atau sebuah frekuensi variabel

diperlukan.Untuk memenuhi persyaratan itu, alat-alat berikut digunakan. Di bawah ini diberi berbagai tipe konverter dan kombinasinya:

1) Konverter AC ke DC

Gambar 2.2*Inverter AC ke DC*

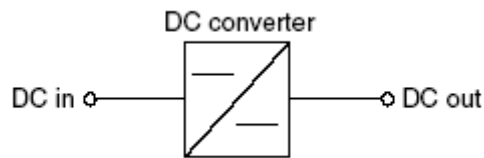
Ini dikelompokkan sebagai:

- dioda penyearah tak terkontrol
- penyearah setengah gelombang
- penyearah gelombang penuh
- penyearah dengan self-commuted devices.

Dalam sebuah penyearah tak terkontrol, tegangan DC konstan pada output berbeda dari suplai AC pada input. Dalam sebuah penyearah setengah gelombang, tegangan DC variabel pada output dengan arus dan tegangan positif dinamakan drive kuadran satu (*single quadrant drive*). Dengan penyearah gelombang penuh, tegangan DC berpolaritas positif/negatif dan arus dalam arah positif dinamakan drive kuadran dua (*double quadrant drive*).Penyearah gelombang penuh mempunyai alat-alat komutasi seperti GTO (gate turn-off thyristors) dan power transistor. Ia bisa merupakan drive kuadran satu atau drive kuadran dua.

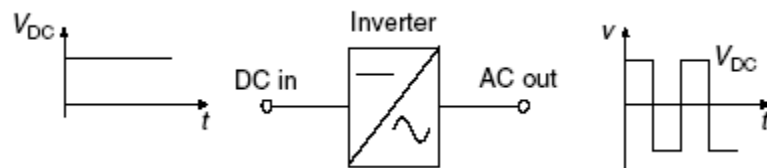
Jika digunakan dengan sebuah penyearah gelombang penuh, ia dapat memberi empat fungsionalitas kuadran, yakni, tegangan dan juga arus dalam kedua arah.

2) Konverter DC ke DC

Juga dikenal sebagai *choppers*, ini memungkinkan tegangan DC variabel pada output, dari tegangan DC tetap yang diberi pada input.

Gambar 2.3 *DC Converter*

Chopper menggunakan alat-alat seperti GTOs, thyristors, power MOSFETs, dan IGBTs (insulated gate bipolar transistor).

3) Konverter atau Inverter DC ke AC

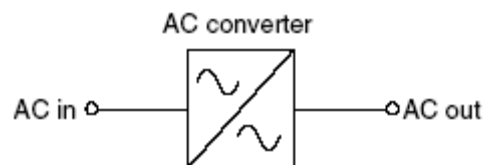
Penggunaan inverter untuk menjamin tegangan AC berfrekuensi variabel pada output dari tegangan DC tetap yang diberi pada input.

Gambar 2.4*Konverter atau Inverter DC ke AC*

Ini adalah tipe sumber tegangan atau tipe sumber arus. Arus atau tegangan output dapat diubah bersama dengan frekuensi melalui tegangan input DC yang bervariasi. Ini terjadi dengan memberi tegangan DC ke inverter melalui sebuah penyearah.Tegangan

variabel, frekuensi AC variabel bisa diperoleh dengan menggunakan PWM (*pulse width modulation*) untuk pengontrolan inverter.

4) Cycloconverter

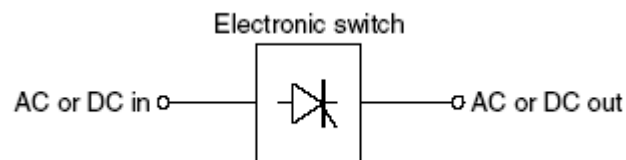
Penggunaan cycloconverter menjamin sebuah tegangan variabel, voltase AC berfrekuensi variabel pada output dari sebuah tegangan tetap, dan frekuensi tegangan AC yang diberi pada input.

Ini dibangun dengan menggunakan thyristors, yang sudut konduknya dikontrol dengan sebuah unit kontrol.

Gambar 2.5*Cycloconverter*

Bagian berikut merinci berbagai komponen dasar elektronika daya. Komponen-komponen ini merupakan satu bagian dasar dari semua sirkuit.

5). Komponen Elektronika Daya

Komponen-komponen elektronika daya adalah alat-alat semikonduktor, seperti dioda, thyristors, transistors, dll yang digunakan dalam sirkuit daya (*power*) dari sebuah konverter.Dalam elektronika daya, mereka digunakan dalam mode switching non-linier (mode on/off) dan bukan sebagai amplifier linier. Dengan kata lain, alat-alat ini berprilaku seperti sebuah saklar (*switch*) elektronik.

Sebuah saklar elektronik menghubungkan atau memutuskan secara elektronik sebuah sirkuit AC atau DC dan biasanya bisa di-switch ON dan/atau OFF.Konduksi biasanya dibolehkan dalam satu arah saja.

Gambar 2.6*Switch*elektronik

Komponen-komponen berikut adalah alat-alat yang umumnya digunakan sebagai saklar elektronik dalam konverter elektronika daya. Perkembangan dalam teknologi semikonduktor telah membuat komponen-komponen elektronika daya ini lebih kecil, lebih handal, lebih efisien (rugi-rugi lebih rendah), lebih murah, dan mampu beroperasi pada tegangan, arus, dan frekuensi yang jauh lebih tinggi. Prinsip-prinsip operasi ideal dari komponen-komponen ini bisa digambarkan dalam ekspressi matematik sederhana.

- Dioda power
- Thyristor power
- GTO
- MOS-controlled thyristor (MCT)
- Bipolar junction transistors (BJT) power
- Field effect transistors (FET, MOSFET)
- Insulated gate bipolar transistor (IGBT)
- Resistors (memberi resistansi)
- Reactors or chockes (memberi induktansi)

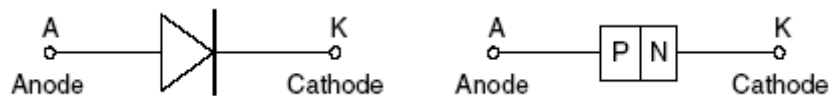
- Kapasitor (memberi kapasitansi)

5.1 Dioda Daya

Dioda power adalah saklar on/off power semikonduktor yang memungkinkan aliran arus dalam satu arah, bergantung pada sambungannya.Ia adalah alat semikonduktor dua terminal.

Kedua terminal dari sebuah dioda dinamakan anoda (A) dan katoda (K).nama-nama ini diperoleh dari saat-saat ketika katup-katup umumnya digunakan.

Menurut konstruksi, mempunyai sebuah persambungan (*junction*) P-N.Ia terdiri dari sebuah layer (*wafer*) silikon dua lapis yang dipasang pada dasar tembaga substansial. Dasar tersebut bertindak sebagai *heat sink*, suatu dukungan untuk penyangga (*enclosure)* dan salah satu terminal elektrik dioda.Permukaan lainnya dari layer (*wafer)* disambungkan ke terminal elektrik lainnya.*Enclosure* menutup *wafer* silikon dari atmosfer dan memberi isolasi yang memadai di antara kedua terminal dioda.

Simbol

Gambar 2.7 Simbol dioda

Ideal

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kerugian

- *switch on/off time*: Sesaat

Ini merupakan forward-biased (panjar maju), bila anoda positif, relatif pada katoda dan dioda mengkonduksi arus, yakni, saklar tertutup. Ia reverse-biased (panjar mundur), bila anoda negatif, relatif pada katoda dan aliran arus dihambat, yakni, saklar terbuka. Kemampuan dioda ini, untuk menghambat aliran arus dalam satu arah, membuatnya cocok untuk aplikasi penyearah, di mana diperlukan untuk membiarkan aliran arus dalam satu arah saja.

Tergantung pada keperluan aplikasi, tipe-tipe dioda berikut tersedia:
Dioda Schottky. Dioda-dioda ini digunakan bilamana penurunan tegangan forward rendah, biasanya 0,4 V, dibutuhkan untuk sirkuit tegangan output rendah. Dioda-dioda ini mempunyai kapabilitas tegangan penghambatan terbatas 50-100 V.

Dioda recovery cepat (Fast recovery diodes). Dioda-dioda ini didesain untuk digunakan dalam sirkuit di mana waktu-waktu recovery cepat diperlukan, misalnya, dalam kombinasi dengan saklar-saklar terkontrol dalam sirkuit-sirkuit berfrekuensi tinggi.Dioda-dioda seperti itu mempunyai waktu recovery (t_{RR}) kurang dari beberapa microsecond.

Line-frekuency diodes. Tegangan on-state dioda-dioda ini didesain serendah mungkin untuk menjamin bahwa mereka switch on secara cepat dalam aplikasi-aplikasi *bridge rectifier*. Sayangnya, waktu recovery (t_{RR}) panjang, tetapi ini layak untuk aplikasi penyearah *line*-frekuensi.Dioda-dioda ini tersedia dengan rating tegangan blocking beberapa kV dan rating arus beberapa ratus kA.Selain itu, mereka dapat disambungkan secara seri atau secara paralel untuk memenuhi keperluan arus atau tegangan tinggi.

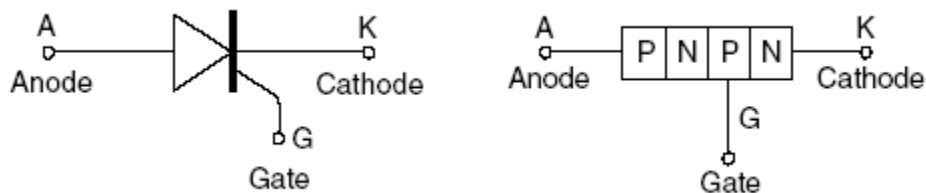
5.2 Thyristor power

Thyristor kadang disebut sebagai SCR (*silicon-controlled rectifiers*). Ini adalah nama yang awalnya diberi pada alat itu ketika ia ditemukan oleh General Electric (USA) sekitar tahun 1957. Tetapi nama ini tidak pernah diterima dan digunakan secara universal.

Nama thyristor adalah istilah generik, yang dipakai pada satu keluarga alat semikonduktor yang mempunyai karakteristik-karakteristik switching regeneratif. Ada banyak alat dalam keluarga Thyristor termasuk thyristor power, GTO, field controlled thyristor (FCT), Triac, dll. Ia mempunyai dua terminal power, yang dinamakan anoda (A) dan katoda (K), serupa dengan sebuah dioda, dan sebuah terminal kontrol ketiga yang dinamakan Gate (G), yang digunakan untuk mengontrol firing (penyalaan) thyristor.

Secara operasional serupa dengan dioda, kecuali bahwa ia memerlukan satu pulsa tegangan positif sementara (*momentary*), pada terminal gate, untuk konduksi bila disambungkan dalam bias-forward. Sebuah thyristor terdiri dari sebuah layer (*wafer)* silikon empat lapisan dengan tiga junction P-N.Thyristor bertegangan tinggi dan ber-daya tinggi kadang juga mempunyai sebuah terminal keempat, yang dinamakan katoda pembantu (*auxiliary*).Ini digunakan untuk sambungan ke sirkuit pemicu.Ini mencegah sirkuit untuk mengganggu sirkuit gate.

Penampilan dan konstruksi thyristor sangat mirip dengan dioda power, kecuali bahwa terminal gate diperlukan untuk memicu thyristor ke dalam mode konduksi.

Simbol

Gambar 2.8Simbol *thyristor*

Ideal

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse-blocking* : lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Switch on/off time*: Sesaat

Thyristor dimatikan (*turn off*) bila ia menjadi *reverse-biased* dan/atau arus *forward* jatuh di bawah arus holding. Ini harus dikontrol secara eksternal dalam sirkuit power.Sebagian besar SCRs mempunyai sebuah *heat sink* untuk mendissipasi panas yang dihasilkan selama operasi.

5.3 Triacs

Ini adalah alat yang berbeda dari kategori thyristor. Menurut konstruksi, dua SCRs disambungkan anti-paralel satu sama lain. SCR mengkonduksi dalam arah *forward* saja, tetapi Triac mengkonduksi dalam kedua arah. Karena itu, jika output dari sebuah dioda adalah arus DC bisa disambungkan dalam sirkuit AC, output dari sebuah Triac adalah arus AC, bukan arus DC. Triac mempunyai tiga terminal yang dinamai MT1, MT2, dan Gate.Triac dapat mengkonduksi dalam arah manapun dengan pulsa gate, baik positif atau negatif.Triac dapat digunakan untuk mengubah-ubah tegangan AC rata-rata yang mengarah ke beban dengan mengubah sudut *firing* (penyalaan).

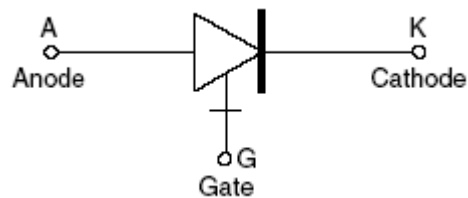
5.3.1 Gate-controlled power electronic devices

Sejumlah alat yang dikontrol gate telah tersedia dalam dekade terakhir. Ini cocok untuk digunakan sebagai saklar bi-stable pada inverter power untuk AC VSDs. Ini dapat dibagi ke dua kelompok utama komponen-komponen berikut:

- Komponen yang didasarkan pada teknologi Thyristor seperti GTO dan FCT
- Komponen yang didasarkan pada teknologi transistor seperti BJT, FET, dan IGBT.

Gate turn-off thyristor (GTO)

Thyristor GTO adalah anggota lain dari keluarga thyristor. Penampilan dan performanya sangat mirip dengan thyristor normal, dengan satu fitur tambahan penting yakni bahwa ia dapat dimatikan (*turn off*) dengan mengaplikasi pulsa arus negatif pada gate. Thyristor GTO mempunyai kapabilitas tegangan dan arus tinggi dan umumnya digunakan untuk konverter yang lebih besar.Ini terutama bila komutasi sendiri (*self-commutation*) diperlukan.

Simbol

Gambar 2.9Simbol *triacs*

Ideal

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking* : lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Performa dari GTO serupa dengan thyristor normal.Konduksi forward dihambat hingga satu pulsa positif diaplikasi ke terminal gate. Bila GTO telah dihidupkan, ia berprilaku seperti thyristor dan terus mengkonduksi bahkan setelah pulsa gate dihilangkan, jika arus itu lebih tinggi dibanding arus holding. GTO mempunyai penurunan tegangan

forward lebih tinggi biasanya 3-5 V. Arus *latching* dan arus *holding* juga sedikit lebih tinggi.

Perbedaan penting adalah bahwa GTO bisa dimatikan dengan satu pulsa arus negatif yang diaplikasi pada terminal gate.Fitur penting ini memungkinkan GTO untuk digunakan dalam sirkuit inverter berkomutasi sendiri.Magnitudo pulsa off besar dan bergantung pada magnuitudo arus dalam sirkuit power. Biasanya arus gate harus 20% dari arus anoda. Akibatnya, sirkuit pemicu harus cukup besar dan ini mengakibatkan kehilangan komutasi tambahan.Seperti thyristor, konduksi dihambat dalam arah *reverse-biased* atau jika arus *holding* jatuh di bawah satu level tertentu.

Karena GTO adalah satu tipe khusus thyristor, sebagian besar karakteristik lain dari sebuah thyristor yang dicakup di atas juga berlaku pada GTO. Konstruksi mekanik GTO sangat mirip dengan thyristor normal dengan tipe-tipe *stud* umum untuk unit-unit yang lebih kecil dan tipe-tipe disk umum untuk unit-unit yang lebih besar. Thyristor GTO biasanya digunakan untuk aplikasi-aplikasi arus dan tegangan tinggi dan lebih kokoh dan toleran pada *over-current*, *over-voltage* dibanding power transistor . GTO tersedia untuk rating hingga 2500 A dan 4500 V. Kelemahan utama adalah arus gate tinggi yang diperlukan untuk mematikan GTO dan penurunan volt forward tinggi.

Field controlled thyristor (FCT)

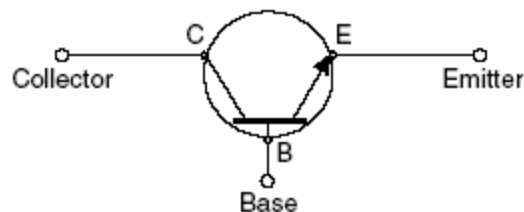
Walaupun GTO mungkin mempertahankan dominasinya untuk aplikasi-aplikasi konverter berdaya tinggi dan ber-komutasi sendiri selama beberapa waktu, tipe-tipe baru thyristor sedang dikembangkan di mana gate dikontrol dengan tegangan.*Turn-on* dikontrol dengan mengaplikasi sinyal tegangan positif pada gate dan *turn-off* dikontrol dengan tegangan negatif.Alat seperti itu dinamakan FCT.Nama itu mempengaruhi kesamaan dengan FET. FCT diharapkan pada akhirnya menggantikan GTO karena ia mempunyai sirkuit kontrol sederhana di mana biaya dan kerugian bisa dikurangi cukup besar.

Bipolar junction transistors (BJT) power

Transistor secara tradisional telah digunakan sebagai alat-alat amplifikasi (penguat), di mana kontrol basis arus digunakan untuk membuat transistor konduktif hingga derajat yang lebih besar atau lebih kecil. Hingga baru-baru ini, mereka tidak banyak digunakan untuk aplikasi power elektronik .

Alasan utama adalah karena sirkuit-sirkuit protektif dan kontrol jauh lebih rumit dan mahal, dan transistor tidak tersedia untuk aplikasi berdaya tinggi. Mereka juga tidak mempunyai kapasitas *overload* thyristor dan untuk melindungi transistor dengan sekering tidak layak.

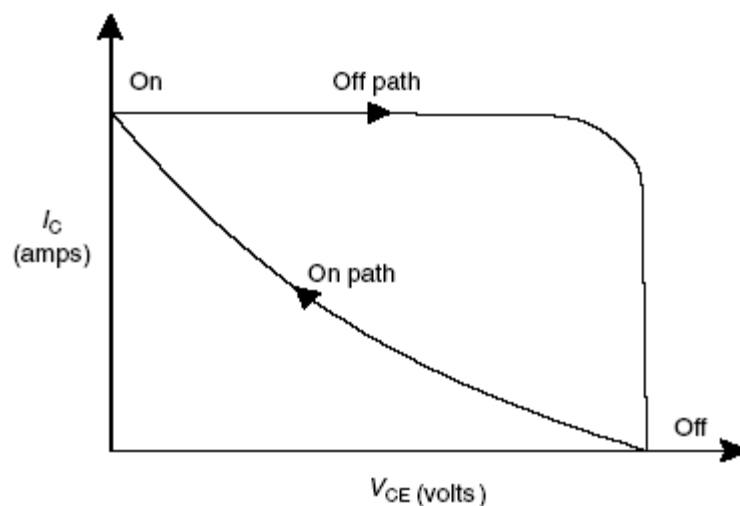
Transistor NPN, yang dikenal sebagai BJT, adalah alat hemat biaya untuk digunakan dalam konverter elektronika daya. BJT modern biasanya disuplai dalam sebuah modul yang dipadatkan dan masing-masing BJT mempunyai dua terminal power, yang dinamakan kolektor (C) dan emitter (E), dan satu terminal kontrol ketiga yang dinamakan base (B).

Simbol

Gambar 2.10Simbol *BJT*

Ideal

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kehilangan (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Sebuah transistor tidak selalu merupakan alat *bi-stable* (on/off). Untuk membuat sebuah transistor sesuai untuk kondisi-kondisi dalam sebuah sirkuit elektronika daya di mana diperlukan untuk men-switch dari keadaan blocking (tegangan tinggi, arus rendah) ke keadaan konduksi (tegangan rendah, arus tinggi) ia harus digunakan dalam kondisi-kondisi ekstrim—sepenuhnya off atau sepenuhnya on. Ini potensial menekan transistor dan trigger, dan sirkuit-sirkuit pelindung harus dikordinir, untuk menjamin transistor tidak dibolehkan beroperasi di luar area operasi amannya. Konduksi forward dihambat hingga arus positif diaplikasi pada terminal gate dan ia mengkonduksi sepanjang tegangan diaplikasi. Selama konduksi forward, juga memperlihatkan penurunan tegangan forward, yang menyebabkan kerugian dalam sirkuit power.BJT bisa dimatikan (*turn off*) dengan mengaplikasi arus negatif pada gate.

Sirkuit-sirkuit kontrol dan protektif telah dikembangkan untuk melindungi transistor terhadap *over-current* ketika dihidupkan dan terhadap *over-voltage* ketika ia dimatikan (Gambar 2.11). Bila dihidupkan, sirkuit kontrol harus menjamin bahwa transistor tidak muncul dari saturasi, kalau tidak akan disyaratkan untuk mendissipasi power tinggi. Dalam prakteknya, sistem kontrol telah terbukti hemat biaya, efisien, dan handal.

Gambar 2.11*Batas-batas V-I yang diinginkan ketika men-switch sebuah BJT*

Berikut ini adalah kelebihan-kelebihan BJT sebagai sebuah saklar:

- Memerlukan tegangan driving yang sangat rendah
- Bisa beroperasi pada kecepatan yang sangat tinggi
- Bisa dihidupkan dan dimatikan dari terminal base, yang membuat mereka cocok untuk sirkuit inverter berkomutasi sendiri
- Kapabilitas penanganan power yang baik
- Penurunan teangan konduksi forward rendah

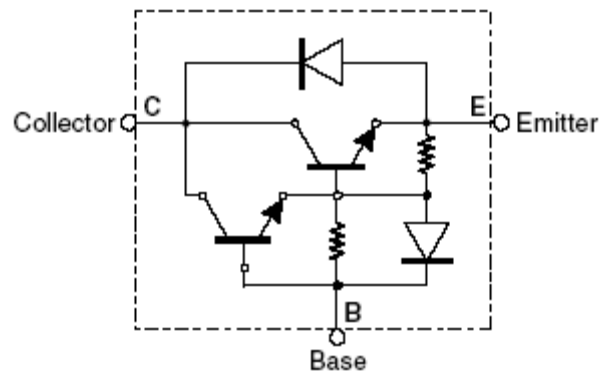
Berikut ini adalah kelemahan BJT sebagai saklar:

- Dianggap kurang kokoh dan kurang toleran terjadi overload dan ‗spikes' dibanding thyristor
- Tidak mentolerir reverse voltage
- Waktu switching relatif lambat dibanding alat lain
- Area operasi aman yang buruk
- Mempunyai persyaratan driver gate terkontrol arus yang kompleks

Thyristor GTO sering lebih disukai dibanding konverter. Bila BJT digunakan dalam bridge inverter, mereka harus dilindungi terhadap *reverse voltage* tinggi, dengan menggunakan sebuah reverse dioda secara seri atau paralel. Karena alasan yang sama, transistor tidak digunakan dalam bridge rectifier yang harus mampu menahan *reverse voltage*.

Faktor amplifikasi base dari sebuah transistor agak rendah (biasanya 5-10 kali). Akibatnya sirkuit *trigger* transistor harus digerakkan oleh transistor pembantu untuk

mengurangi magnitudo arus *trigger base* yang diperlukan dari sirkuit kontrol. Untuk melakukan ini, sambungan Darlington digunakan.

Gambar 2.12 menunjukkan sebuah sambungan Darlington rangkap, tetapi untuk aplikasi ber-power tinggi, dua transistor pembantu (*triple Darlington*) bisa digunakan dalam *cascade* untuk mencapai faktor amplifikasi yang diperlukan.Faktor amplifikasi menyeluruh secara aproksimasi merupakan produk dari faktor-faktor amplifikasi dari dua (atau tiga) transistor.

Gambar 2.12*Transistor Darlington power*

Transistor, yang digunakan dalam aplikasi VSD, biasanya dipabrikasi sebagai satu *integrated circuit* dan dipadatkan ke dalam sebuah modul tiga terminal, bersaing dengan komponen-komponen perlu lainnya, seperti resistor dan dioda perlindungan anti paralel. Modul itu mempunyai sebuah base terisolasi yang cocok untuk pemasangan langsung ke *heat sink*. Tipe modul ini kadang dinamakan modul transistor Power Darlington.
Seperti ditunjukkan dalam Gambar 6.3, dioda anti-paralel melindungi transistor dari bias terbalik (*reverse-biasing*).Dalam prakteknya, dioda ini adalah konstruksi terpadu lambat dan mungkin tidak cukup cepat untuk aplikasi inverter.Akibatnya, pabrikan konverter

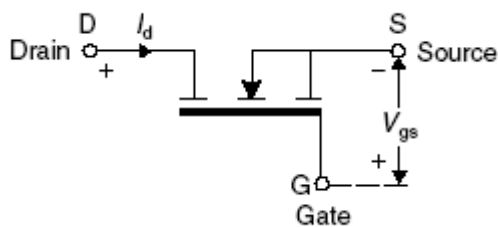
kadang menggunakan sebuah dioda cepat eksternal untuk melindungi transistor. BJT power tersedia untuk rating hingga maksimum sekitar 300 A dan 1400 V. Untuk VSD yang memerlukan rating power lebih tinggi, GTO biasanya digunakan dalam sirkuit inverter.

Field effect transistor (FET)

BJT adalah alat yang digerakkan arus.Arus mengalir melalui kontrol-kontrol base dan aliran arus adalah antara kolektor dan emitter.FET Gate dikontrol oleh tegangan.FET adalah tipe khusus transistor yang terutama cocok untuk aplikasi switching berkecepatan tinggi.

Kelebihan utamanya adalah bahwa Gate dikontrol oleh tegangan, bukan dikontrol oleh arus.Ia berprilaku seperti resistansi yang dikontrol tegangan dengan kapasitas untuk performa berfrekuensi tinggi.

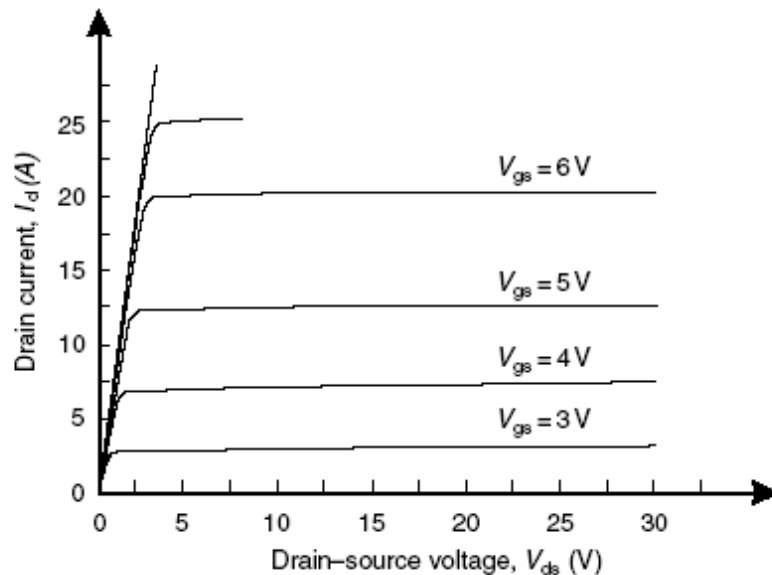
FET tersedia dalam sebuah konstruksi khusus yang dikenal sebagai MOSFET. MOS adalah kependekan dari *metal oxide silicon*. MOSFET adalah alat tiga terminal dengan terminal-terminal yang dinamakan source (S), drain (D), dan gate (G), koresponden dengan emitter, kolektor, dan gate dari transistor NPN.

Simbol

Gambar 2.13Simbol *FET*

Ideal

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Performa menyeluruh dari sebuah FET serupa dengan sebuah power transistor, kecuali bahwa gate dikontrol oleh tegangan. Konduksi forward dihambat jika tegangan gate rendah, biasanya kurang dari 2 V. Bila tegangan positif V_{gs} diaplikasi ke terminal gate, FET mengkonduksi dan arus naik dalam FET ke level yang bergantung pada tegangan gate. FET akan mengkonduksi sepanjang tegangan gate diaplikasi. FET dapat dimatikan dengan menghilangkan tegangan yang diaplikasi ke terminal gate atau dengan membuatnya negatif.

MOSFETs adalah alat pembawa mayoritas, sehingga mereka tidak diperburuk oleh waktu-waktu switching lama.Dengan waktu switching mereka yang sangat singkat, kehilangan switching rendah.Akibatnya, mereka paling cocok untuk aplikasi switching berfrekuensi tinggi.Satu karakteristik performa biasa dari FET ditunjukkan dalam Gambar 2.14.

Gambar 2.14 Karakteristik biasa dari sebuah *FET*

Awalnya, switching berkecepatan tinggi bukan satu persyaratan penting untuk aplikasi konverter AC. Dengan perkembangan inverter PWM, switching berfrekuensi tinggi telah menjadi satu fitur yang diinginkan untuk memberi bentuk gelombang arus output smooth. Akibatnya, FET power tidak banyak digunakan hingga sekarang.
Kini FET hanya digunakan untuk konverter berfrekuensi PWM kecil. Rating tersedia dari sekitar 100 A pada 50 V hingga 5 A pada 1000 V, tetapi untuk aplikasi VSD, MOSFET perlu dalam range 300-600 V. Kelebihan dan kekurangan MOSFET nyaris merupakan kebalikan dari BJT.

Kelebihan utama MOSFET power diberi di bawah:

- Kapabilitas switching berkecepatan tinggi (10 – 100 ns)
- Sirkuit perlindungan relatif sederhana
- Gate driver terkontrol tegangan yang relatif sederhana dengan arus gate rendah.

Kelemahan atau kekurangan utama MOSFET power adalah:

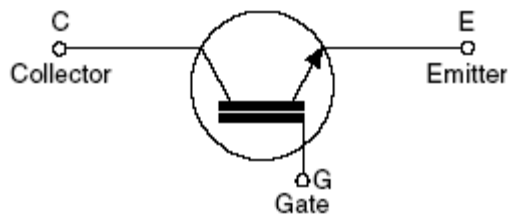
- Kapabilitas penanganan power relatif rendah
- Penurunan forward voltage relatif tinggi, yang mengakibatkan kehilangan lebih tinggi dibanding GTO dan BJT, membatasi penggunaan MOSFET untuk aplikasi power lebih tinggi.

Insulated gate bipolar transistor (IGBT)

IGBT adalah usaha untuk menyatukan fitur-fitur terbaik teknologi BJT dan teknologi MOSFET.

Konstruksi IGBT serupa dengan MOSFET dengan satu lapisan tambahan untuk memberi modulasi konduktivitas, yang merupakan alasan untuk tegangan berkonduksi rendah BJT power.

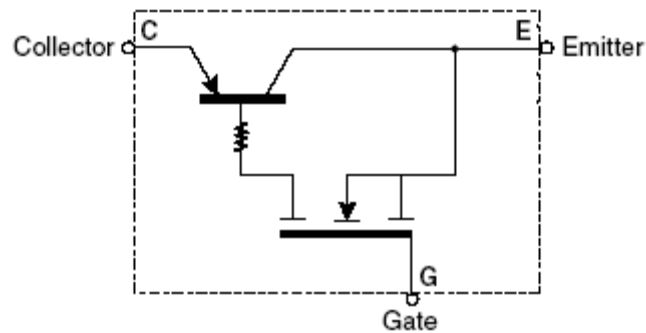
Piranti IGBT mempunyai satu forward blocking yang baik tetapi mempunyai kemampuan reverse blocking yang sangat terbatas. Ia dapat beroperasi pada densitas arus lebih tinggi dibanding BJT atau MOSFET dengan memungkinkan ukuran chip yang lebih kecil. IGBT adalah alat tiga terminal. Terminal-terminal power dinamakan emitter (E) dan kolektor (C), dengan menggunakan terminologi BJT, sementara terminal kontrol dinamakan gate (G), dengan menggunakan terminologi MOSFET.

Simbol

Gambar 2.15Simbol *IGBT*

Ideal

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Sirkuit ekivalen elektrik dari IGBT menunjukkan bahwa IGBT bisa dianggap sebagai alat *hybrid* (campuran), serupa dengan konfigurasi transistor Darlington, dengan sebuah driver MOSFET, dan sebuah transistor PNP bipolar. Walaupun simbol sirkuit di atas

menunjukkan bahwa alat tersebut terkait dengan transistor NPN, ini tidak boleh diambil secara harfiah.

Gambar 2.16Simbol *IGBT*

Karakteristik *gate input* dan persyaratan *gate drive* sangat mirip dengan yang untuk MOSFET power. Tegangan ambang batas (*threshold*) biasanya adalah 4V.Turn-on memerlukan 10-15 V dan membutuhkan sekitar 1 μs.Turn-off membutuhkan sekitar 2 μs dan bisa diperoleh dengan mengaplikasi 0 V ke terminal gate.Waktu *turn-off* bisa dipercepat, bila perlu, dengan menggunakan tegangan drive negatif.Alat-alat IGBT bisa dihasilkan dengan waktu switching yang lebih cepat dengan akibat penurunan tegangan forward yang meningkat.
IGBT sekarang tersedia dalam rating-rating mulai dari beberapa amps hingga 500 A pada 1500 V, yang cocok untuk AC VSDs tiga fase yang di-rate hingga sekitar 500 kW pada 380 V/415 V/480 V. Mereka dapat digunakan pada frekuensi switching hingga 100 kHz. BJTs kini sebagian besar telah digantikan dengan IGBTs untuk AC VSDs.

Berikut ini adalah kelebihan utama IGBT:

- Kapabilitas penanganan power yang baik

- Penurunan tegangan konduksi forward rendah 2-3 V, yang lebih tinggi dibanding untuk BJT tetapi lebih rendah dibanding untuk MOSFET dari rating serupa.
- Tegangan ini meningkat seiring dengan temperatur yang membuat alat tersebut mudah dioperasikan secara paralel tanpa bahaya instabilitas termal.
- Kapabilitas switching berkecepatan tinggi
- Gate driver terkontrol tegangan yang relatif sederhana
- Arus gate rendah.

Beberapa fitur penting lain IGBT adalah:

- Tidak ada breakdown sekunder dengan IGBT, yang memberi area operasi aman yang baik dan kehilangan switching rendah.
- Hanya snubbers kecil diperlukan
- Kapasitansi inter-elektroda tidak sepenting dalam MOSFET, sehingga mengurangi *feedback* Miller.

Tidak ada dioda bodi dalam IGBT, sebagaimana dengan MOSFET, dan sebuah dioda terpisah harus ditambahkan dalam anti-paralel bila konduksi terbalik diperlukan, misalnya, dalam inverter sumber tegangan.

6. Kelistrikan VSD

Motor DC mendominasi dalam aplikasi VSD disebabkan oleh reliabilitas mereka.Mereka juga membantu untuk menciptakan konverter dan sirkuit kontrol yang lebih murah.
Sebagaimana telah kita lihat sebelumnya, motor induksi AC terutama adalah motor berkecepatan konstan. Sejak 1980an, popularitas AC VSDs telah berkembang cepat, terutama disebabkan oleh berbagai kemajuan dalam teknologi elektronik power dan teknologi kontrol digital, yang mempengaruhi biaya dan performa tipe VSD ini. Daya

tarik utama dari AC VSDs adalah reliabilitas kuat dan biaya rendah motor induksi AC *squirrel-cage* (sarang tupai) dibanding motor DC.

Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.17, berbagai perubahan dalam drives yang digunakan berkenaan dengan waktu telah ditunjukkan. Seksi-seksi gambar 2.17 (a), (b), (c) dan (d) adalah seperti berikut:

(a) Sistem Ward-Leonard

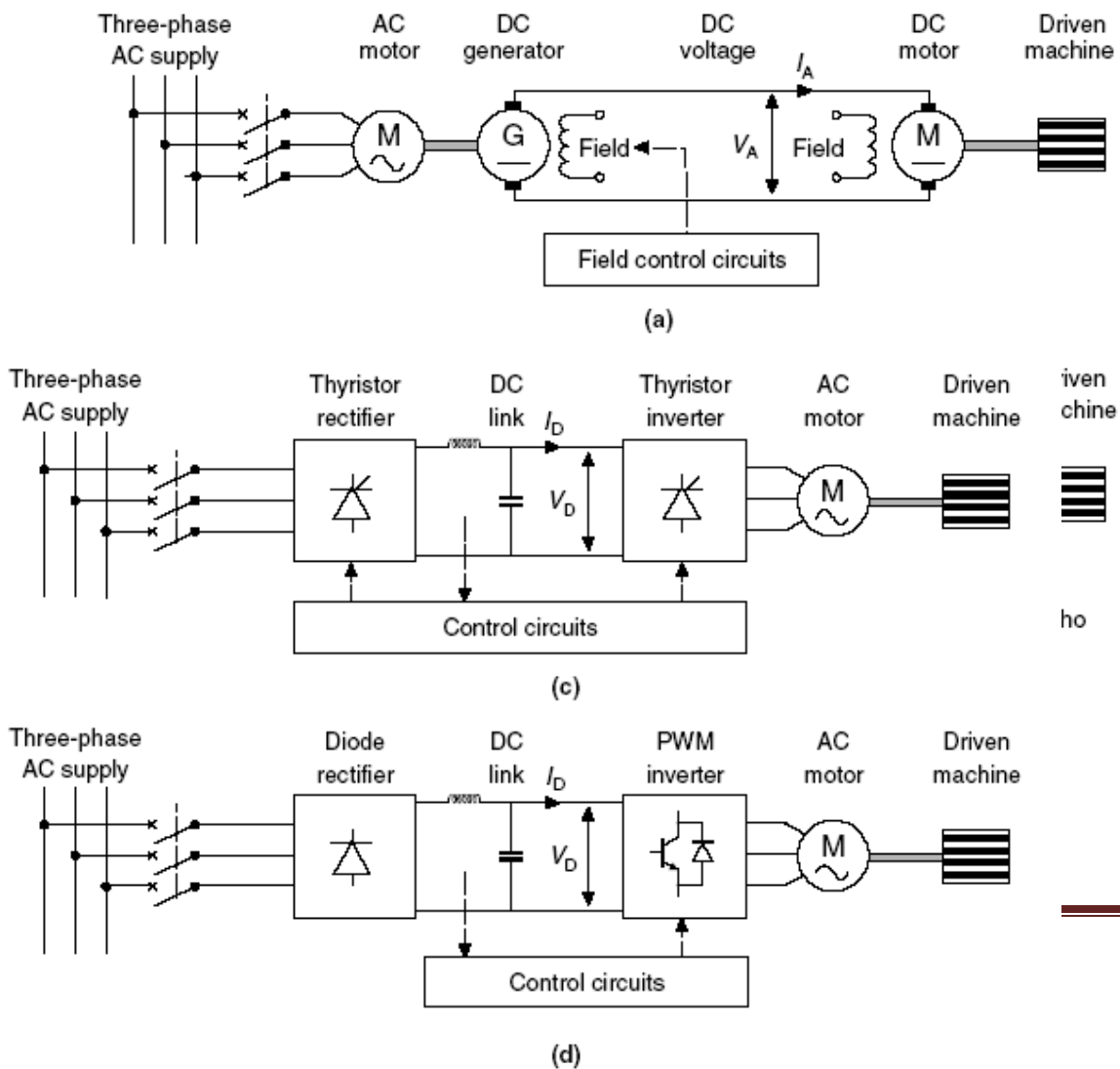
(b) Drive DC terkontrol thyristor

(c) Drive AC inverter sumber tegangan (PAM)

(d) Drive AC sumber tegangan PWM (PWM

(a)

(c)

(d)

Gambar 2.17 Komponen-komponen utama dari berbagai tipe *VSD*

Alur perkembangan dari sistem Ward-Leonard ke drive DC terkontrol thyristor dan kemudian ke konverter ber-tegangan variabel dam berfrekuensi variabel AC tipe PWM diillustrasikan dalam Gambar 2.17. Dalam langkah pertama, dari (a) ke (b), generator – motor set berbiaya tinggi telah digantikan dengan rectifier thyristor terkontrol fase. Dalam langkah kedua, dari (b) ke (d), motor DC berbiaya tinggi telah digantikan dengan inverter PWM elektronik power dan sebuah motor induksi AC kuat sederhana. Dalam VSD AC, sistem komutasi mekanik motor DC telah digantikan dengan sirkuit elektronik power yang dinamakan inverter. Tetapi kesulitan utama dengan VSD AC selalu kompleksitas, biaya, dan reliabilitas sirkuit inverter frekuensi AC.

Pengontrolan kecepatan motor AC

Berbagai perkembangan dalam elektronik power selama 10-15 tahun terakhir telah membuat mungkin untuk mengontrol bukan saja kecepatan motor induksi AC tetapi juga *torque* (kopel). AC-VSDs modern, dengan kontrol flux-vector, sekarang bisa memenuhi semua persyaratan performa dari aplikasi-aplikasi yang paling rumit sekalipun.

Metode-metode kontrol kecepatan mencakup:

1. Kontrol tegangan stator
2. Kontrol frekuensi suplai
3. kontrol resistansi rotor
4. perubahan kutub (*pole*)

biasanya, kontrol kecepatan motor AC dicapai dengan mengubah-ubah frekuensi suplainya. Untuk mempertahankan membuat kerugian sangat sedikit, frekuensi tegangan terminal diubah untuk membuat rasio v/f konstan.Metode kontrol frekuensi

pengubahan kecepatan motor AC adalah teknik terkenal selama puluhan tahun.tetapi baru belakangan ini ia telah menjadi metode kontrol VSD yang layak secara teknis dan ekonomis.

Drive AC telah menjadi metode kontrol kecepatan yang lebih hemat biaya, dibanding drive DC, untuk sebagian besar aplikasi VSD hingga 1000 kW. Ia juga merupakan solusi yang lebih disukai secara teknis, untuk banyak lingkungan industri, di mana reliabilitas dan maintenance rendah, yang terkait dengan motor induksi *squirrel-cage* AC penting.

Tegangan suplai AC mains dikonversi ke arus dan tegangan DC melalui sebuah *rectifier* (penyearah).Arus dan tegangan DC disaring untuk memperhalus puncak-puncak sebelum dimasukkan ke inverter, di mana mereka dikonversi ke frekuensi dan tegangan AC variabel. Tegangan output dikontrol, sehingga rasio antara tegangan dan frekuensi tetap konstan untuk menghindari over-fluxing motor. Motor AC mampu memberi rated torque (kopel nominal)nya atas range kecepatan hingga 50 Hz, tanpa kenaikan signifikan dalam kerugian-kerugian.

Motor bisa dijalankan pada kecepatan-kecepatan di atas frekuensi nominal (*rated frequency*), tetapi dengan *torque* output yang berkurang. Torque direduksi karena reduksi dalam *air-gap flux*, yang bergantung pada rasio V/f. Pada frekuensi-frekuensi di atas frekuensi base 50 Hz, torque direduksi sebanding dengan pengurangan kecepatan.

Salah satu kelebihan utama dari sistem kontrol kecepatan VVVF (*variable voltage variable frequency*) adalah bahwa, walaupun kontrol-kontrol mesti kompleks, motor sendiri bisa merupakan sebuah *konstruksi squirrel-cage*, yang barang kali merupakan bentuk motor elektrik paling kokoh dan beban *maintenance* yang tersedia. Ini terutama berguna bilamana motor-motor dipasang di lokasi berbahaya, atau dalam posisi-posisi yang tidak dapat diakses, yang membuat pembersihan dan maintenance rutin sulit. Di lokasi-lokasi yang memerlukan mesin mempunyai panyangga (*enclosure*) tahan api atau bahkan kedap air, sebuah motor induksi AC *squirrel-cage* akan lebih murah dibanding motor DC.

Di sisi lain, satu masalah tambahan dengan motor *squirrel-cage* AC standar bila digunakan untuk aplikasi berkecepatan variabel adalah bahwa mereka didinginkan dengan menggunakan kipas yang dipasang pada poros. Pada kecepatan-kecepatan rendah, pendinginan dikurangi, yang mempengaruhi kemampuan beban dari drive. Torque output kontinu dari drive harus di-*de-rated* untuk kecepatan-kecepatan lebih rendah, kalau sebuah kipas pembantu ber-power terpisah tidak digunakan untuk mendinginkan motor. Ini serupa dengan persyaratan pendinginan motor-motor DC, yang memerlukan kipas pendinginan pembantu ber-power terpisah.

Kontrol kecepatan motor DC

Drive DC banyak digunakan dalam industri karena kecepatan variabel, regulasi kecepatan yang baik, pengereman, dan kemampuan pembalikannya.

Di masa lalu, motor DC digunakan di sebagian besar aplikasi VSD terlepas dari kompleksitas, biaya tinggi, dan keperluan *maintenance* tinggi motor DC.

Bahkan sekarangpun drive DC masih sering digunakan untuk aplikasi-aplikasi VSD yang lebih rumit. Contoh-contoh dari ini adalah drive seksional untuk mesin kertas yang memerlukan respon dinamik cepat dan kontrol kecepatan dan *torque* terpisah.

Metode-metode kontrol kecepatan adalah sebagai berikut :

1. Kontrol Tegangan armature
2. Kontrol field flux

Sebagian besar drive DC menggunakan metode kontrol tegangan armature dan kontrol field flux, untuk mencapai regulasi kecepatan, masing-masing di bawah kecepatan nominal (*rated speed*) dan di atas kecepatan nominal. Dalam kedua kasus, konverter atau rectifier yang setengah terkontrol atau terkontrol sepenuhnya digunakan untuk mencapai tegangan DC variabel, dari tegangan AC, untuk mensuplai ke tegangan armature.

Drive AC dan drive DC biasanya menggunakan konverter atau rectifier dan inverter. Bagian berikut merinci alat-alat seperti itu.

7. Penyearah Elektronika Daya (Konverter Ac/Dc)

Piranti ini mengkonversi power supply AC satu fase atau tiga fase ke arus dan tegangan DC halus (*smooth*). Alat-alat bi-stable sederhana, seperti dioda dan thyristor, bisa secara efektif digunakan untuk tujuan ini.

7.1 Asumsi

Ketika menganalisa sirkuit elektronik power, diasumsikan bahwa alat-alat semikonduktor bi-stable, seperti dioda dan thyristor, adalah saklar-saklar ideal, tanpa ada kehilangan dan penurunan tegangan forward minimal. Juga akan diasumsikan bahwa reaktor, kapasitor, resistor, dan komponen lain sirkuit-sirkuit tersebut mempunyai karakteristik-karakteristik linier ideal tanpa ada kerugian.

Begitu operasi sebuah sirkuit dipahami, ketidaksempurnaan yang terkait dengan komponen-komponen praktis bisa diperkenalkan untuk memodifikasi performa sirkuit elektronik power.Dalam elektronik power, operasi suatu konverter bergantung pada saklar yang sedang di-ON dan di-OFF-kan secara berangkai. Arus melewati sebuah saklar ketika ia ON dan dihambat ketika ia OFF.

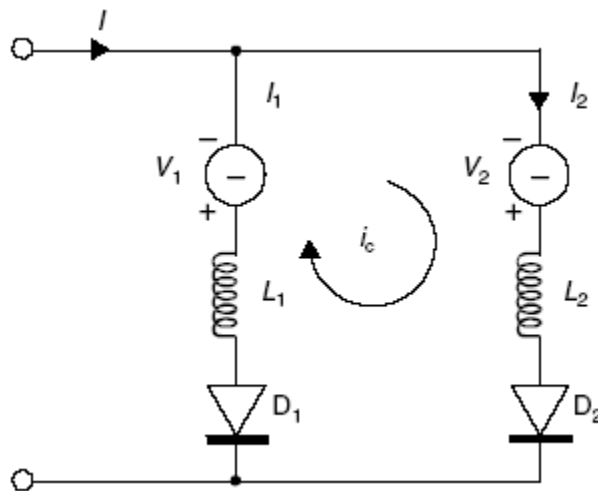
Komutasi adalah transfer arus dari satu saklar yang menjadi OFF, ke saklar lainnya yang menjadi ON. Dalam sebuah sirkuit rectifier dioda, sebuah dioda menjadi ON dan kemudian mulai mengkonduksi arus bila ada tegangan forward melintasinya, yakni, tegangan forward yang melintasinya menjadi positif. Proses ini biasanya menghasilkan tegangan forward pada dioda lain yang menjadi negatif, yang kemudian mematikan dan menghentikan pengkonduksian arus.

Dalam sebuah sirkuit rectifier thyristor, saklar-saklar juga membutuhkan sinyal gate untuk membuat mereka on dan off.Faktor-faktor yang mempengaruhi komutasi diilustrasikan dalam sirkuit dioda ideal dalam Gambar 2.18, yang menunjukkan dua cabang sirkuit, masing-masing dengan induktansi sirkuit dan sumber tegangan DC variabelnya sendiri.Pada mulanya asumsikan bahwa arus I sedang mengalir melalui sirkuit dan bahwa magnitudo tegangan V_1 lebih besar dibanding V_2. Karena $V_1 > V_2$, dioda D_1 mempunyai tegangan forward positif padanya dan ia mengkonduksi arus I_1 melalui induktansi sirkuitnya L1. Dioda D_2 mempunyai tegangan forward negatif yang menghambat dan tidak memuat arus.

Akibatnya, pada waktu t_1

$$I_1 = I\sqrt{2}$$

$$I_2 = 0$$

Anggaplah tegangan V_2 dinaikkan ke harga yang lebih besar dari V_1, tegangan forward pada dioda D_2 menjadi positif, dan ia mulai menghidupkan (on). Tetapi induktansi sirkuit L1 mencegah arus I_1 untuk berubah segera dan dioda D_1 tidak akan segera mati (off). Karena itu, dioda D_1 dan dioda D_2 tetap ON selama suatu periode tumpang-tindih yang dinamakan waktu komutasi T_c.

Gambar 2.18 *Sirkuit sederhana untuk mengillustrasikan komutasi dari Dioda D_1 ke D_2*

Bila kedua dioda di-on-kan, sebuah sirkuit tertutup dibentuk yang melibatkan kedua cabang. Tegangan sirkuit efektif $V_c = (V_2 - V_1)$, yang dinamakan tegangan komutasi, menggerakkan arus sirkulasi I_c, yang dinamakan arus komutasi, melalui kedua cabang yang mempunyai total induktansi sirkuit $L_c = (L_1 + L_2)$.

Dalam sirkuit ideal ini, penurunan tegangan pada dioda-dioda itu dan resistensi sirkuit telah diabaikan. Dari teori elektrik dasar mengenai sirkuit induktif, arus I_c meningkat seiring dengan waktu pada suatu rate yang bergantung pada induktansi sirkuit. Magnitudo arus komutasi bisa dihitung dari persamaan-persamaan berikut:

$$(V_2 - V_1) = (L_1 + L_2)\frac{di_c}{dt}$$

$$V_c = L_c \frac{di_c}{dt}$$

Jika komutasi mulai pada waktu t_1 dan selesai pada waktu t_2, magnitudo arus komutasi $I_c$pada suatu waktu t, selama periode komutasi, bisa dihitung, dengan mengintegrasikan persamaan di atas dari waktu t_1 ke t.

$$I_c = \frac{1}{L_c}\int V_c dt$$

Selama periode komutasi, diasumsikan bahwa arus menyeluruh melalui sirkuit tetap konstan.

$$I = (I_1 + I_2) \quad \text{konstan}$$

Ketika arus komutasi yang bersirkulasi meningkat, berikut ini berlaku:

- Arus (I_2) melalui dioda yang menjadi ON meningkat harganya

$$I_2 = I_c \text{ meningkat}$$

- Arus (I_1) melalui dioda yang sedang menjadi OFF menurun harganya.

  $I_1 = I – I_c$ menurun

Untuk contoh khusus ini, dapat diasumsikan bahwa tegangan komutasi V_c konstan selama periode singkat komutasi. Pada waktu t, integrasi menghasilkan harga $I_c$berikut, yang naik secara linier seiring dengan waktu.

$$I_c = \frac{V_c}{L_c}(t - t_1)$$

Bila I_c telah meningkat ke sebuah harga yang sama dengan arus beban I pada waktu t_2, maka arus itu telah ditransfer dari cabang 1 ke cabang 2, dan arus melalui saklar yang menjadi off telah turun ke nol. Maka komutasi lengkap. Akibatnya, pada waktu t_2

$I_1 = 0$

$I_2 = I_c = I$

Pada akhir komutasi ketika $t = t_2$, yang menempatkan I_c ke I dalam persamaan di atas, waktu yang dihabiskan untuk mentransfer arus dari satu cabang sirkuit ke yang lainnya (waktu komutasi), bisa dihitung sebagai berikut:

$$I = \frac{V_c(t_2 - t_1)}{L_c}$$

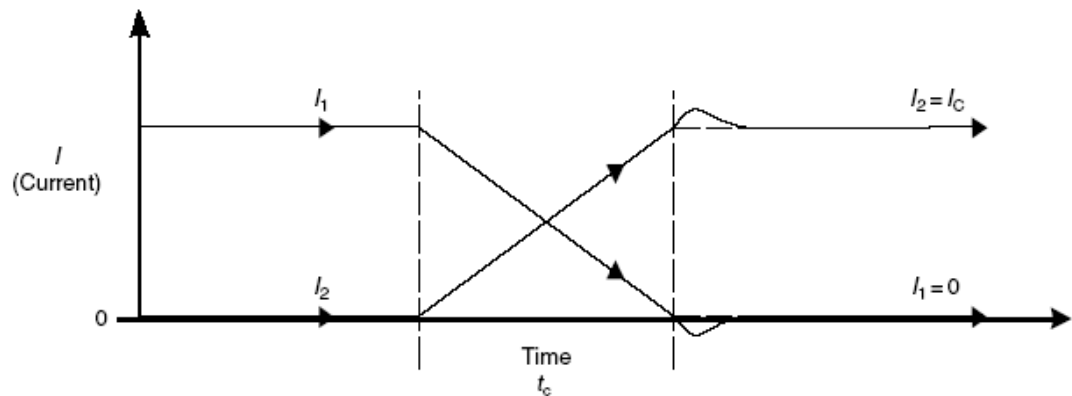
$$I = \frac{V_c t_c}{L_c}$$

$$t_c = I\frac{L_c}{V_c}$$

Jelas dari persamaan tersebut bahwa waktu komutasi t_c bergantung pada induktansi sirkuit menyeluruh (L_1 + L_2) dan tegangan komutasi. Dari sini kita dapat menyimpulkan berikut ini:

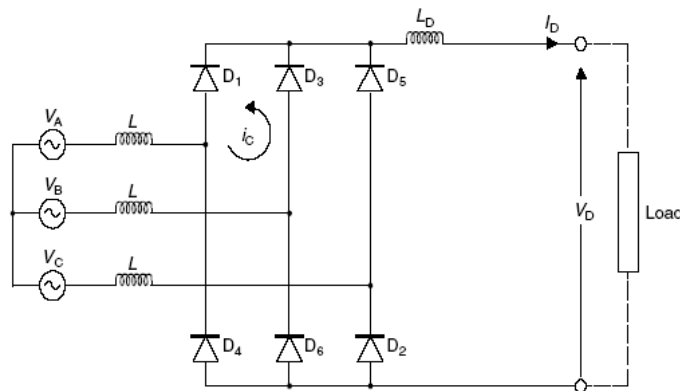
- Suatu induktansi sirkuit besar akan menghasilkan waktu komutasi panjang.

- Suatu tegangan komutasi besar akan menghasilkan waktu komutasi pendek.

Dalam prakteknya, sejumlah deviasi dari situasi ideal ini terjadi.Dioda-dioda tidak ideal dan tidak mati (*off*) segera bila tegangan forward menjadi negatif. Bila sebuah dioda pengkonduksi disajikan dengan reverse voltage, sejumlah arus reverse masih bisa mengalir selama beberapa microsecond, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5-2. Arus I_1 terus menurun di luar nol ke harga negatif sebelum kembali ke nol. Ini disebabkan oleh beban bebas yang harus dipindahkan dari junction PN sebelum penghambatan dicapai.

Gambar 2.19*Arus dalam masing-masing cabang selama komutasi*

Sekalipun waktu komutasi sangat pendek, tegangan komutasi dari sebuah *AC-fed rectifier bridge* tidak tetap konstan tetapi berubah sedikit selama periode komutasi. Tegangan komutasi yang meningkat akan cenderung mengurangi waktu komutasi.

7.2 Komutasi tiga fase dengan jembatan enam dioda

Dalam sirkuit konverter elektronik power praktis, komutasi mengikuti rangkaian dasar yang sama seperti yang dijabarkan di atas. Gambar 5-3 menunjukkan sebuah sirkuit bridge rectifier enam pulsa untuk mengkonversi arus-arus AC tiga fase I_A, I_B, dan I_C, ke arus DC I_D.

Gambar 2.20 *Komutasi tiga fase dengan bridge dioda enam diode*

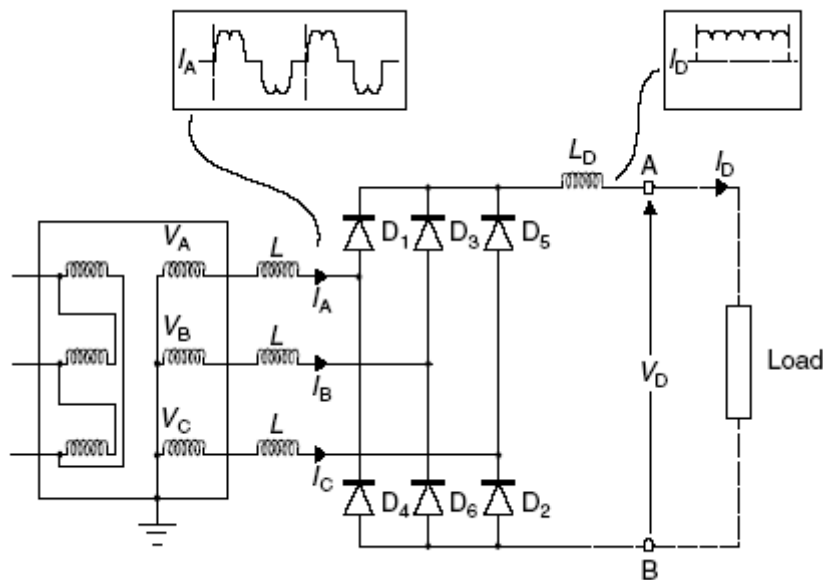
Tipe sirkuit ini relatif sederhana untuk dianalisa karena hanya dua dari keenam dioda mengkonduksi arus pada satu waktu.Sirkuit komutasi ideal tersebut bisa dengan mudah diidentifikasi.Dalam contoh ini, komutasi diasumsikan terjadi dari dioda D_1 ke D_3 dalam kelompok positif, sementara D_2 mengkonduksi dalam kelompok negatif.

Dalam sirkuit bridge elektronik power, biasa (konvensional) menomori dioda-dioda tersebut D_1 sampai D_2 dalam rangkaian di mana mereka di ON dan di-OFF-kan.Bila V_A adalah tegangan tertinggi dan V_C terendah, D_1 dan D_2 mengkonduksi.

Sama dengan sirkuit ideal dalam Gambar 2.20, bila V_B naik melebihi V_A, D_3 menjadi on dan komutasi mentransfer arus dari dioda D_1 ke D_3.Sebagaimana sebelumnya, waktu komutasi bergantung pada induktansi sirkuit (L) dan tegangan komutasi (V_B – V_A).Sebagaimana dapat terlihat dari contoh bridge rectifier dioda enam pulsa dalam Gambar 2.21, komutasi biasanya diawali oleh perubahan-perubahan eksternal.

Dalam kasus ini, tegangan-tegangan line suplai tiga fase mengontrol komutasi.Dalam aplikasi lain, komutasi bisa juga diawali atau dikontrol oleh faktor-faktor lain, bergantung pada tipe konverter dan aplikasi.Karena itu, konverter sering digolongkan menurut sumber perubahan ekstern yang memulai komutasi. Dalam contoh di atas, konverter dikatakan dikomutasi line karena sumber tegangan komutasi adalah pada line suplai utama. Sebuah konverter dikatakan berkomutasi sendiri jika sumber tegangan komutasi berasal dari dalam konverter itu sendiri.Konverter terkomutasi gate adalah contoh-contoh sejenisnya.

7.3 Line-Commutated diode rectifier bridge

Salah satu dari sirkuit paling umum yang digunakan dalam elektronik power adalah bridge rectifier enam pulsa terkomutasi line tiga fase, yang terdiri dari enam dioda dalam sebuah sambungan bridge. Bridges satu fase tidak akan dikonversi di sini karena operasi mereka dapat dideduksi sebagai satu penyederhanaan bridge tiga fase.

Gambar 2.21 *Bridge rectifier dioda line-komutasi*

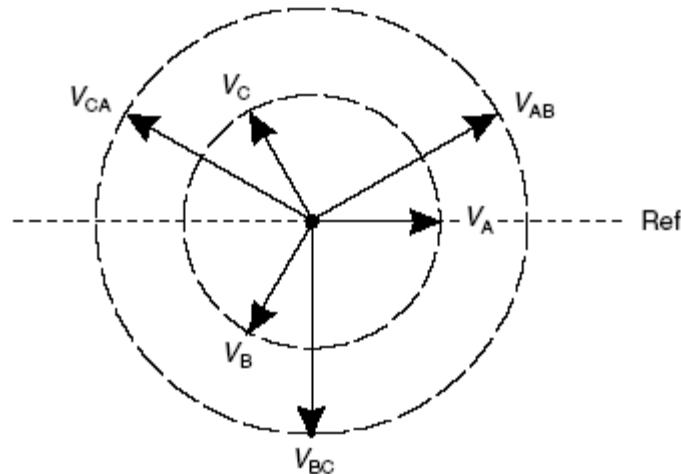
Asumsi

- Tegangan-tegangan suplai kuat/tinggi dan sepenuhnya sinusoidal
- Komutasi segera dan tidak mempunyai masalah recovery
- Arus beban sepenuhnya smooth
- Transformator dan komponen line linier dan ideal
- Tidak ada penurunan volt (tegangan) dalam saklar elektronik power.

Asumsi-asumsi ini dibuat untuk mendapatkan pemahaman mengenai sirkuit-sirkuit itu dan untuk membuat taksiran-taksiran arus, tegangan, waktu komutasi, dll. Selain itu, kondisi-kondisi pembatas yang mempengaruhi performa konverter-konverter praktis dan deviasi mereka dari kondisi-kondisi ideal akan diperiksa untuk menjembatani (*bridge*) gap dari yang ideal ke yang praktis.

Dalam bridge dioda, dioda-dioda tersebut tidak dikontrol dari sebuah sirkuit kontrol eksternal. Melainkan, komutasi diawali secara eksternal oleh perubahan-perubahan yang terjadi dalam tegangan-tegangan line suplai, karena itulah namanya rectifier terkomutasi line (*line-commutated rectifier*).
Menurut konvensi, dioda-dioda tersebut dilabelkan D_1 sampai D_6 dalam rangkaian tegangan-tegangan line suplai.

Tegangan-tegangan suplai tiga fase terdiri dari tiga bentuk gelombang tegangan sinusoidal, terpisah 120^0, yang naik ke harga maksimum mereka dalam rangkaian A-B-C.Menurut konvensi, tegangan-tegangan fase ke netral dilabelkan V_A, V_B, dan V_C dan tegangan-tegangan fase ke fase adalah V_{AB}, V_{BC}, dan V_{CA}, dll.

Tegangan-tegangan ini biasanya ditunjukkan secara grafik sebagai sebuah diagram vektor, yang berotasi berlawanan jarum jam pada frekuensi 50 kali per detik. Sebuah diagram vektor dari tegangan-tegangan ini serta amplitudo-amplitudo dan posisi-posisi relatif mereka ditunjukkan dalam Gambar 2.22. Bentuk-bentuk gelombang tegangan sinusoidal, dari tegangan suplai, bisa diperoleh dari rotasi diagram vektor.

Gambar 2.22*Diagram vektor tegangan-tegangan suplai main tiga fase*

Output konverter adalah tegangan DC rectified V_D, yang menggerakkan arus DC I_D melalui beban pada sisi DC rectifier. Dalam sirkuit ideal tersebut, diasumsikan bahwa arus DC I_D konstan dan sepenuhnya smooth tanpa tegangan kerut (*ripple*).Bridge terdiri dari dua kelompok komutasi, satu tersambung ke leg positif, yang terdiri dari dioda-dioda D_1-D_3-D_5, dan satu tersambung ke leg negatif, yang terdiri dari dioda-dioda D_4-D_6-D_2.Komutasi tersebut mentransfer arus dari satu dioda ke yang lainnya secara berangkai dan masing-masing dioda mengkonduksi arus untuk 120^0C setiap siklus, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.22.

Dalam kelompok atas, terminal DC positif mengikuti tegangan tertinggi dalam rangkaian V_A-V_B-V_C via dioda-dioda D_1-D_3-D_5.Bila V_A mendekati puncak positifnya, dioda

D_1mengkonduksi dan tegangan terminal DC positif mengikuti V_A.Arus DC mengalir melalui beban dan kembali via salah satu dioda kelompok lebih rendah. Pada waktu yang sama, V_B naik dan pada akhirnya mencapai satu titik, di mana ia menjadi sama dengan dan mulai melebihi V_A. Pada poin ini, tegangan forward pada dioda D_3 menjadi positif dan ia mulai menjadi on. Tegangan komutasi dalam sirkuit ini, V_B-V_A mulai menggerakkan suatu arus komutasi yang meningkat walaupun induktansi sirkuit dan arus melalui D_3 mulai meningkat, ketika arus dalam D_1 menurun.Dalam serangkaian peristiwa yang serupa dengan yang digambarkan di atas, komutasi terjadi dan arus ditransfer dari dioda D_1 ke dioda D_3.Pada akhir periode komutasi, dioda D_1 dihambat dan terminal DC positif mengikuti V_B hingga komutasi berikutnya terjadi, untuk mentransfer arus ke dioda D_5.Setelah dioda D_5, komutasi mentransfer arus kembali ke D_1 dan siklus ini berulang.

Dalam kelompok lebih rendah, satu rangkaian serupa peristiwa-peristiwa terjadi, tetapi di sini tegangan-tegangan negatif dan arus mengalir dari beban kembali ke main.Awalnya D_2 diasumsikan mengkonduksi ketika V_C lebih negatif dibanding V_A. Ketika waktu berjalan, V_A menjadi sama dengan V_C dan kemudian menjadi lebih negatif. Komutasi terjadi dan arus ditransfer dari dioda D_2 ke D_4.Dioda D_2 menjadi off dan dioda D_4 menjadi on.Arus kemudian ditransfer ke dioda D_6, lalu kembali ke D_2 dan siklus ini berulang.

Dalam Gambar 2.22, periode-periode konduksi dioda-dioda dalam kelompok atas dan kelompok bawah ditunjukkan pada beberapa siklus suplai tiga fase. Ini menunjukkan bahwa hanya dua dioda mengkonduksi arus pada suatu waktu (kecuali selama periode komutasi, yang diasumsikan pendek secara infinit) dan bahwa masing-masing dari keenam dioda mengkonduksi selama hanya satu bagian dari siklus dalam satu rangkaian reguler.Komutasi terjadi secara bergantian dalam kelompok atas dan kelompok bawah.

Tegangan output DC V_D bukan sebuah tegangan smooth dan terdiri dari bagian-bagian bentuk gelombang tegangan fase ke fase. Untuk setiap siklus 50 Hz AC *Waveform* (20 ms), tegangan DC V_D terdiri dari bagian-bagian enam pulsa tegangan, V_{AB}, V_{AC}, V_{BC}, V_{BA}, V_{CA}, V_{CB}, dll., karena itulah namanya bridge rectifier enam pulsa.
Magnitudo rata-rata dari tegangan DC bisa dihitung dari bentuk gelombang tegangan yang ditunjukkan dalam Gambar 2.22.Harga rata-rata diperoleh dengan mengintegrasikan tegangan atas salah satu dari bagian 120^0 berulang dari kurva tegangan DC. Integrasi ini menghasilkan sebuah magnitudo rata-rata dari tegangan V_D sebagai berikut:

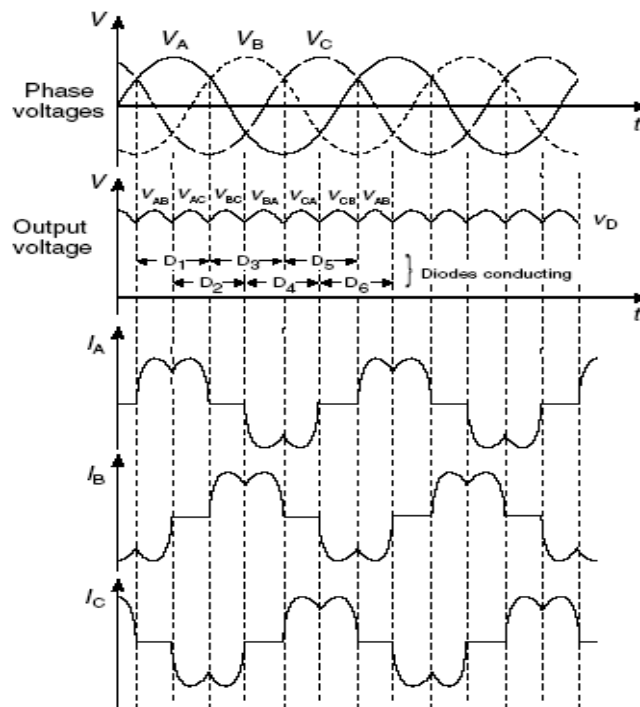
$$V_D = 1.35x(RMS\ phase - Phase\ Voltage)$$

$$V_D = 1.35xV_{RMS}$$

Contohnya, jika V_{RMS} = 415 V, maka V_D = 560 DC. Bila ada induktansi yang cukup dalam sirkuit DC, maka arus DC I_D akan mantap (*steady*) dan arus suplai DC akan terdiri dari segmen-segmen arus DC dari masing-masing dioda secara berangkai.

Sebagai contoh, arus dalam fasilitas A ditunjukkan dalam Gambar 2.23. Arus non-sinusoidal yang mengalir dalam masing-masing fase mains suplai dapat mempengaruhi performa suatu peralatan AC lain yang tersambung. Dalam prakteknya, untuk menjamin bahwa kapabilitas tegangan penghambat reverse (*reverse blocking voltage*) dispesifikasi secara tepat, perlu mengetahui magnitudo tegangan penghambat reverse yang muncul pada masing-masing dioda pada line suplai yang didesain untuk beroperasi dengan bentuk-bentuk gelombang sinusoidal.

Secara teoritis, Tegangan reverse maksimum pada sebuah dioda sama dengan puncak tegangan fase ke fase. Contohnya, Tegangan reverse V_{CA} dan V_{CB} muncul pada dioda D_5 selama periode penghambat (*blocking*). Dalam prakteknya, satu faktor pengaman (*safety factor*) sebesar 2,5 umumnya digunakan untuk menspesifikasi kapabilitas penghambat reverse (*reverse blocking*) dioda-dioda dan saklar-saklar elektronik power

lain. Pada sebuah bridge rectifier yang diisi dari suplai power 415 V, Tegangan penghambat reverse V_{bb} dari dioda harus lebih tinggi dari 2,5 x 440 V = 1100 V. Karena itu, praktis secara umum digunakan dioda-dioda dengan tegangan penghambat reverse (*reverse -blocking voltage*) 1200 V.

Gambar 2.24Bentuk gelombang tegangan dan arus selama komutasi

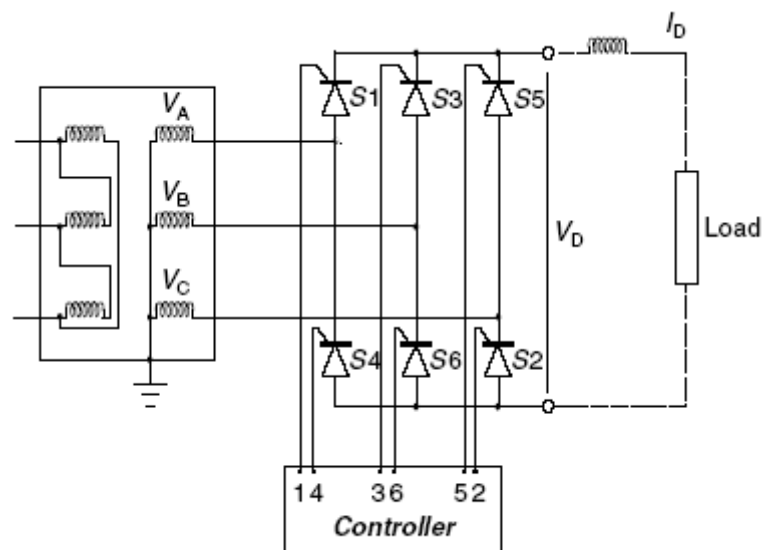
7.4 Line-commutated thyristor rectifier bridge

Tegangan searah (DC) output dan sekuens operasional diode rectifier dalam Gambar 2.24, bergantung pada perubahan kontinu tegangan *suplly line* dan tidak bergantung pada rangkaian kontrol. Oleh karena itu, ini dinamakan sebagai diode rectifier bridge tak

terkontrol karena output tegangan searah tidak terkontrol dan berharga tetap, yakni 1,35 x Vrms

Jika dioda ini digantikan dengan thyristor, maka terbuka kemungkinan mengontrol suatu titik dimana thyristor diaktifkan dan, dengan demikian, besarnya tegangan output searah dapat dikontrol.Konverter semacam ini dinamakan thyristor rectifier bridge terkontrol.Ini membutuhkan rangkaian kontrol tambahan, untuk mengaktifkan thyristor pada saat yang tepat.Suatu konverter thyristor enam pulsa tipikal diperlihatkan dalam Gambar 2.24.
Berdasarkan bab terdahulu, syarat-syarat yang diperlukan agar suatu thyristor meghantarkan arus dalam suatu rangkaian elektronika daya (*power electronic*) adalah sebagai berikut:

- Tegangan forward harus terdapat pada thyristor
- Suatu pulsa positif harus diberikan terhadap thyristor gate.

Jika masing-masing thyristor diaktifkan sesaat ketika tegangan forward di dalamnya cenderung positif, maka *thyristor rectifier* beroperasi dengan cara yang sama dengan diode rectifier yang diterangkan di atas. Semua gelombang tegangan dan arus dari *diode bridge* juga bekerja pada *thyristor bridge*.

Gambar 2.25*Thyristor rectifier bridge terkontrol enam pulsa*

Suatu thyristor bridge yang beroperasi seperti ini disebut beroperasi dengan delay angle (sudut penundaan) nol dan memberi output tegangan sebesar:

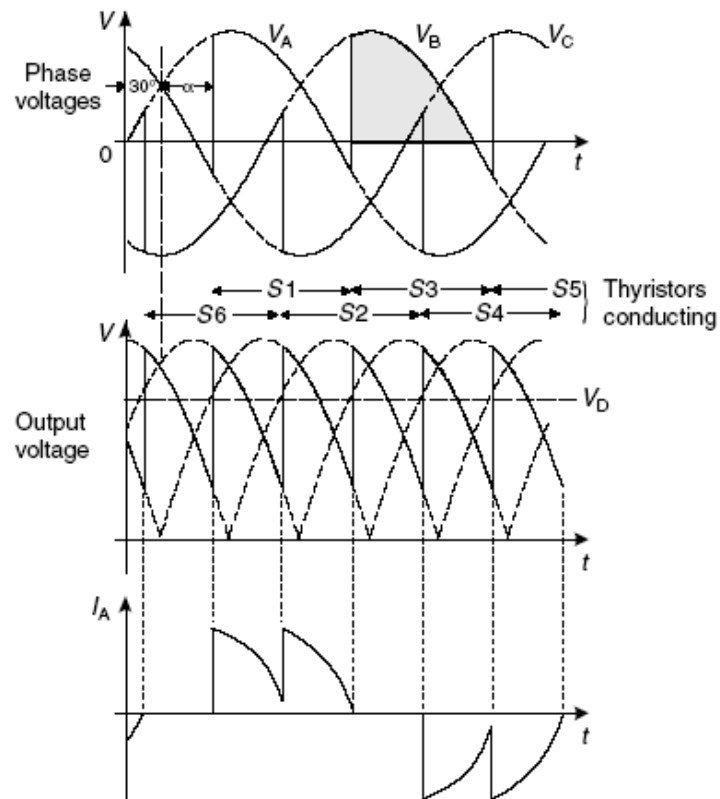
$$V = 1,35 \times V_{RMS}$$

Output rectifier bridge dapat dikontrol, dengan menunda waktu sesaat (*instantaneous*) dimana thyristor menerima pulsa pemicu (*triggering pulse*).Penundaan ini biasanya diukur dalam derajat, dari titik dimana tombol CAN dihidupkan, karena tegangan forward menjadi positif.Sudut penundaan ini dinamakan sudut penundaan (*delay angle*), atau kadang-kadang dinamakan firing angle, dan ditulis dengan lambang (□). Titik acuan untuk *delay angle* adalah titik dimana suatu gelombang tegangan fase memotong tegangan fase terdahulu dan menjadi positif. Diode rectifier dapat dibayangkan sebagai sebuah konverter dengan *delay angle* = 0 derajat. Tujuan utama pengontrolan suatu konverter adalah mengontrol besarnya tegangan output searah. Umumnya, semakin besar delay angle, semakin kecil tegangan searah. Dibawah operasi dalam keadaan mantap dari suatu sebuah konverter thyristor terkontrol, *delay angle* untuk masing-masing switch adalah sama. Gambar 2.26 memperlihatkan gelombang tgangan, dimana pengaktifan saklar telah ditunda oleh suatu sudut sebesar □ derajat.

Operasi

Dalam kelompok saklar positif, terminal searah (DC) positif mengikuti tegangan yang dimiliki saklar, yang dalam konduksi dalam urutan Va-Vb-Vc. Mula-mula diasumsikan bahwa thyristor S1 yang berasosiasi dengan tegangan Va dikonduksikan dan S3 belum diaktifkan. Tegangan pada bus positif pada sisi searah DC mengikuti tegangan Va yang menurun karena, tanpa adanya suatu konduksi S3, masih ada tegangan forward pada S1 dan hal itu akan terus menyebabkan konduksi.

Jika suatu S3 diaktifkan (dipicu) sesudah delay angle = α, maka tegangan pada bus positif meloncat menjadi Vb, yang harganya kemudian diikuti. Pada momen instant ini, dimana S1 dan S3 menghantar, suatu tegangan komutansi negatif yang sama dengan Vb-Va terlihat pada S1 selama periode komutasi, yang kemudian mulai mati. Seiring dengan waktu, Vb mencapai puncak sinusoidnya dan kemudian menurun, yang diikuti dengan terminal searah DC positif. Dalam waktu yang bersamaan, Vc meningkat dan

ketika S5 diakifkan, dalam susunan yang sama peristiwa yang sama berulang dan arus dikomutasikan ke S5.

Gambar 2.26 Gelombang tegangan suatu rectifier terkontrol.

Untuk diode rectifier, harga rata-rata tegangan searah dapat dihitung, dengan mengintegrasikan gelombang tegangan dalam periode 120 derajat, yang mewakili suatu bagian berulang dari tegangan searah. Pada *delay angle*α, tegangan searah diberikan oleh persamaan berikut:

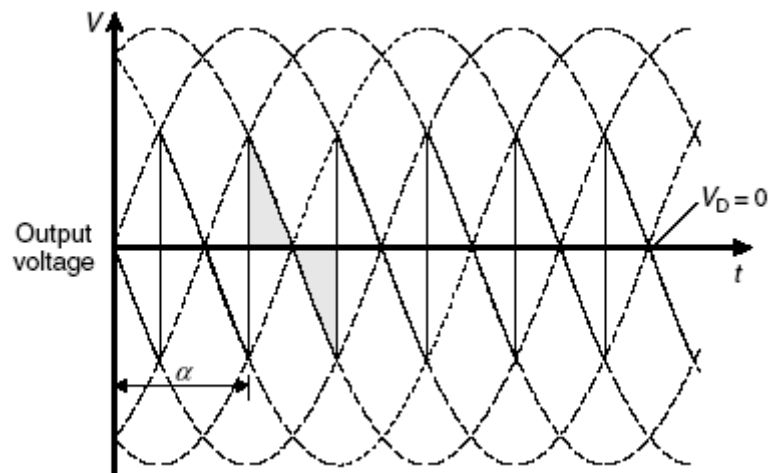
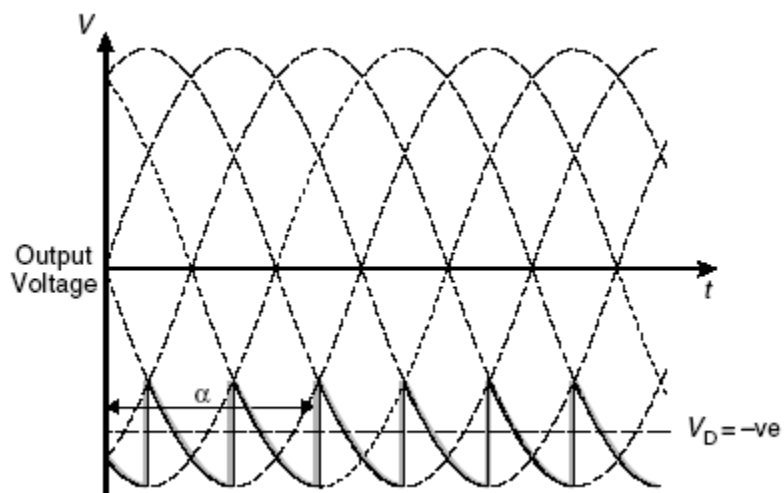
$$V_D = 1.35x\ (RMS\ phase - Phase\ Voltage)x\cos\alpha$$

$$V_D = 1.35x\ V_{RMS}\, x\cos\alpha$$

Rumus ini menunjukkan bahwa ouput tegangan teoritis dari thyristor rectifier dengan *firing angle* = 0 sama dengan output tegangan searah untuk diode rectifier. Ini juga menunjukkan bahwa harga rata-rata tegangan searah akan menurun jika *delay angle* bertambah besar dan bergantung pada cosinus delay angle. Bila α = 90 derajat dan cosinus α = 0 dan Vd = 0, yang berarti bahwa harga rata-rata tegangan searah sama dengan nol. Harga sesaat (*instantaneous*) tegangan searah sama dengan suatu *saw-tooth voltage* (tegangan gigi gergaji), seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 2.26.

Jika delay angle diperbesar lagi, harga rata-rata tegangan searah menjadi negatif. Dalam operasi semacam ini, konverter beroperasi sebagai inverter.Perlu dicatat bahwa arah arus searah ini tetap tidak berubah karena arus ini dapat mengalir melalui saklar dalam satu arah.Akan tetapi, dengan tegangan searah negatif, arah aliran daya terbalik (*reverse*), dan aliran daya (*power flow*) dari sisi searah ke sisi bolak-balik. Sebuah operasi keadaan mantap (*Steady satate*) pada mode ini,hanya mungkin, jika ada sumber tegangan di sisi DC, harga *instantaneous voltage* (tegangan sesaat) searah untuk α yang lebih besar dari 90 derajat diperlihatkan dalam Gambar 2.28. Suatu operasi keadaan mantap, dalam mode ini, dimungkinkan hanya jika terapat suatu sumber tegangan pada sisi searah.Harga sesaat tegangan searah untuk α yang lebih besar daripada 90 derajat diperlihatkan dalam Gambar 2.28.

Dalam praktiknya, komutasi tidak sesaat dan berkesudahan dalam suatu periode yang bergantung pada induktansi rangkaian dan besarnya tegangan komutasi. Seperti dalam

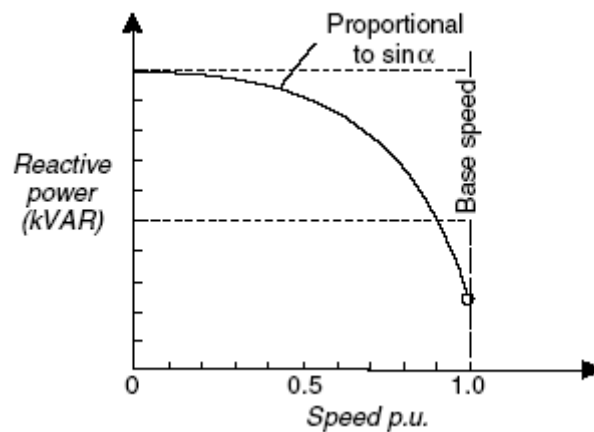
kasus yang dikemukakan di atas, kita dapat menaksir waktu komutasi, dari induktansi rangkaian komutasi dan taksiran tegangan komutasi.

Gambar 2.27Tegangan output DC untuk delay angle = 90 derajat.

Gambar 2.28 *Tegangan output DC ketika delay angle lebih besar daripada 90 derajat.*

Seperti dalam diode rectifier, arus searah keadaan mantap ***Id*** membentuk segmen-segmen arus dari masing-masing tiga fase pada sisi arus bolak-balik. Pada sisi arus bolak-balik. Pada arus bolak-balik, arus pada masing-masing fase terdiri atas blok-blok non-sinusoid, yang mirip dengan blok-blok yang berasosisasi dengan diode rectifier dan dengan konsekuensi-konsekuensi harmonis (*harmonic consequences*) yang sama. Dalam kasus diode bridge, dengan delay angle = 0, sudut antara arus fase dan tegangan fase yang berkorespondensi pada sisi arus bolak-balik hampir sama dengan nol. Akibatnya, faktor daya sama dengan satu dan konverter berfungsi seperti beban resistif.

Untuk rectifier terkontrol, dengan delay angle α, sudut antara arus fase dan tegangan fase yang berkorespondensi juga sama dengan α, dan dinamakan sebagai power factor angle (sudut factor daya) ∅. Sudut ini harus dinamakan sebagai faktor displacement karena sudut ini tidak benar-benar mewakili power factor. Akibatnya, bila delay angle thyristor rectifier berubah dan mereduksi tegangan searah, sudut antara arus fase dan tegangan juga berubah dengan besar perubahan yang sama. Kemudian konverter berperilaku seperti beban resistif-induktif dengan faktor displacement sebesar cosinus ∅. Telah diketahui bahwa faktor power yang berasosiasi dengan rectifier terkontrol menurun, dimana tegangan output searah menurun.

Salah satu contohnya adalah pengendali motor searah yang dikontrol oleh *thyristor converter*. Seiring dengan menurunnya tegangan searah, untuk mengurangi laju motor searah, pada torsi konstan, faktor daya menurun dan dibutuhkan daya reaktif yang lebih besar pada sumber jala-jala ke konverter.

Delay Angle	Converter Behavior
$\alpha = 0°$	Behaves like a *Resistive load*
$0° < \alpha < 90°$	Behaves like a *Resistive/Inductive load* and absorbs active power
$\alpha = 90°$	Behaves like an *Inductive load* with no active power drawn
$\alpha > 90°$	Behaves like an *Inductive load* but is also a **source** of active power

Seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 2.29 , seiring dengan menurunnya kecepatan hingga di bawah kecepatan dasar, syarat power reaktif tetap meningkat.

Gambar 2.29 .*Syarat power reaktif dari suatu motor drive searah dengan torsi konstan yang diberi beban (fed) dari konverter komutasi-line*.

Keterbatasan Praktis Konverter Komutasi-line

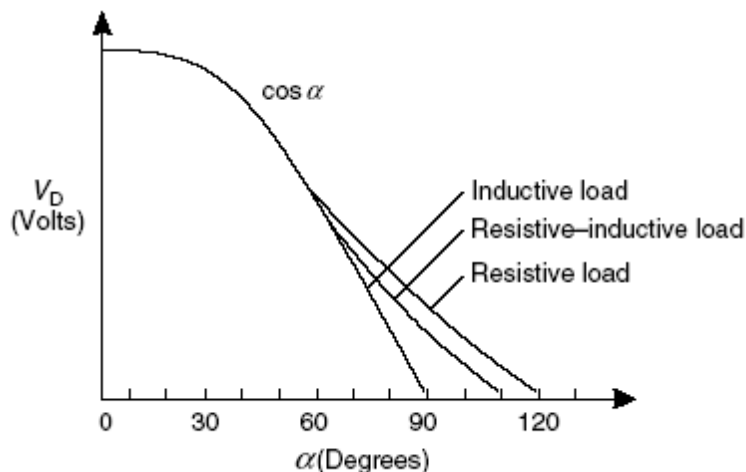
Analisis di atas mencakup aspek-aspek teoritis dari konverter tak terkontrol dan terkontrol.Dalam praktiknya, komponen-komponen ini tidak ideal dan komutasi tidak sesaat (*instantaneous*).Ini menghasilkan deviasi tertentu dari kinerja teoritis. Salah satu deviasi ini adalah bahwa arus beban searah tidak pernah mulus (*smooth*).

Penyebab:

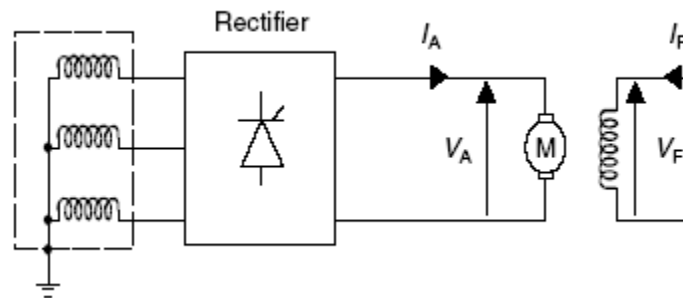
- menerima bahwa tegangan searah sesaat (*instantaneous*) tidak pernah benar-benar mulus, jika beban benar-benar resistif, arus beban searah tidak pernah benar-benar mulus karena arus ini akan mengikuti secara linier tegangan searah.
- Demikian pula, pada delay angle yang lebih besar dari 60 derajat, tegangan output searah menjadi diskontinu dan demikian juga arus searah.

Perbaikan :

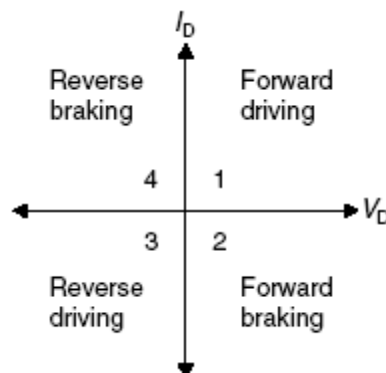
Dalam upaya mempertahankan suatu arus searah yang mulus, konverter praktis biasanya memiliki induktansi *Ld* secara seri dengan beban pada sisi searah. Untuk benar-benar memuluskan, harga Ld harus tak tentu secara teoritis, yang tentunya tidak praktis.

Konsekuensi praktisnya adalah bahwa rumus teoritis untuk harga tegangan searah hasil perhitungan (Vd = 1,35 V rms cosinus) tidak seluruhnya benar untuk semua harga delay angle. Pengukuran praktis mengkonfirmasi bahwa hal itu benar hanya untuk delay angle hingga 75 derajat, akan tetapi hal ini bergantung pada tipe beban dan khususnya induktansi beban searah. Pengalaman memperlihatkan bahwa untuk sudut delay angle yang lebih besar daripada 60 derajat, tegangan searah rata-rata akan lebih tinggi daripada harga teoritis, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5-12.

Gambar 2.30 .*Deviasi tegangan searah dari teoritis versus delay angle.*

Aplikasi untuk Rectifier Komutasi-Line

Salah satu aplikasi penting konverter komutasi lini adalah motor drive searah. Gambar 2.31 memperlihatkan suatu konverter komutasi line tunggal terkontrol yang dihubungkan dengan armature suatu motor searah. Konverter ini memberikan suatu tegangan searah berubah terhadap armature motor tersebut. Dengan cara inilah rangkaian kontrol konverter digunakan untuk mengubah kecepatan motor.

Gambar 2.31.*Coverter-fed DC motor drive*.

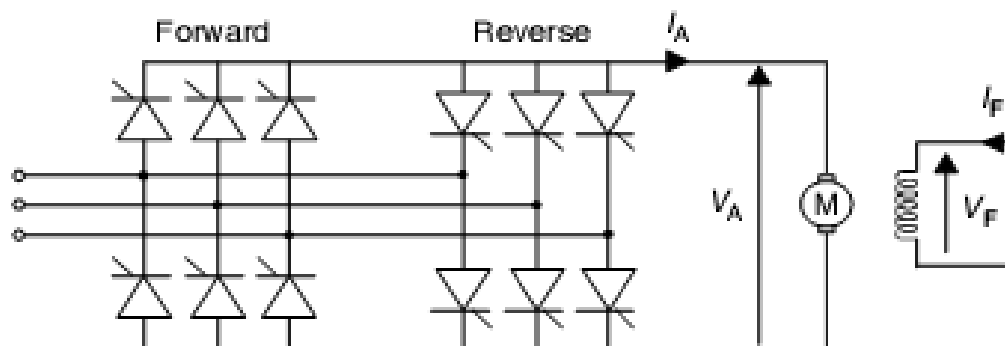
Apabila *delay angle* lebih kecil daripada 90 derajat, maka tegangan DC positif dan suatu arus *Ia* positif mengalir ke armature motor searah, untuk mengirimkan power aktif ke beban tersebut. Sistem drive ini dikatakan beroperasi pada kuadran pertama (Gambar 2.32), di mana motor bergerak ke arah depan, dengan suatu transfer power aktif dari supply ke motor dan beban mekanisnya.

Jika *delay angle* konverter ditingkatkan ke suatu sudut yang lebih besar daripada 90 derajat, tegangan Vd akan menjadi negatif dan motor akan melambat hingga kecepatan diam. Arus Id juga menurun menjadi nol dan *supply line* dapat diputuskan dari motor tanpa memutuskan arus.

Gambar 2.32 .*Kuadran operasi untuk SVD*

Akibatnya, untuk menghentikan motor searah, delay angle harus diperbesar hingga mencapai harga yang leih besar daripada 90 derajat untuk memastikan bahwa tegangan Vd menjadi negatif. Dengan Vd negatif dan Id yang masih positif, konverter berperilaku sesaat seperti sebuah generator dan menghasilkan suatu *braking torque*.

Disamping itu, hal ini berfungsi sebagai suatu brake untuk memperlambat motor dan bebannya dengan cepat ke suatu harga tetap. Dalam situasi ini, drive system disebut beroperasi pada kuadran kedua dimana motor bekerja pada arah forward. Konverter yang dibahas sejauh ini merupakan konverter tunggal, yang hanya bisa beroperasi dengan arus tegangan searah (Id = +ve), yang berarti bahwa motor dapat bekerja hanya pada arah forward tetapi suatu power aktif dapat ditransfer pada dua arah. Konverter searah tunggal hanya bisa beroperasi dalam kuadran 1 dan kuadran 4 dan dikenal sebagai konverter kuadran kedua.

5.5 Penyearah Kuadran Thyristor yang dapat dikontrol.

Konsep pengoperasian kuadran empat di ilustrasikan pada gambar dibawah ini. Disini menunjukan empat kemungkinan keadaan operasi dari sistem kendali dan menunjukkan arah V_D dan I_D untuk aplikasi pengendali motor DC. Untuk pengoperasian kuadran 3 dan 2, disini harus memungkinkan untuk menbalik arah dari I_D. Ini diperlukan tambahan dengan menghubungkan jembatan konverter untuk mengalirkan arus dengan arah yang berlawanan. Jenis konverter ini adalah konverter DC kuadran-empat, dan kadang-kadang disebut penyearah ganda enam pulsa (*double or six-pulse rectifier*) gambar 2.33.

Gambar 2.33. Penyearah Kuadran-empat.

Pengendali motor DC yang disuplai dengan konverter DC kuadran-empat, pengoperasian semua keempat kuadran adalah memungkinkan untuk mengontrol kecepatan serta arah maju dan mundur.

Operasi

Perubahan arah putaran motor dapat dengan cepat tercapai. Konverter-1 digunakan sebagai penyearah yang dapat dikontrol untuk mengontrol kecepatan dengan arah putaran maju, dimana konverter-2 memblokir, dan sebaliknya arah mundur,

Dengan asumsi pada awalnya, bahwa motor bekerja pada arah maju, yang dikontrol oleh konverter-1, dengan sudut konduk < 90^0 dan konverter-2 memblokir. Perubahan urutan dari arah maju menjadi arah mundur adalah sebagai berikut :

- Sudut konduk konverter-1 naik menjadi $\alpha > 90^0$. Ini artinya bahwa tegangan DC $V_D > 0$ dan arus DC turun.
- Jika $I_D = 0$, konverter-1 memblokir dan thyristor pemicunya terputus.
- Setelah penundaan sesaat, konverter-2 tidak memblokir dan inverter mulai dengan sudut konduk lebih dari 90^0.

- Jika motor masih berputar dengan arah maju, arus DC konverter-2 I_D mulai naik pada arah negatif dan mesin DC bekerja sebagai generator, mengembalikan energi ke suplai jala-jala.
- Adapun sudut konduk berkurang menjadi $\alpha<90^0$, konverter-2 berubah dari inverter menjadi penyearah, dan tegangan V_D naik, motor mulai berputar dengan arah berlawanan.

Pada pengendali motor DC, membalik arah putaran dapat juga dilakukan dengan menggunakan konverter tunggal dan dengan merubah arah arus eksitasi.
Metoda ini hanya dapat digunakan dimana persyaratan pengendali tidak dikhususkan untuk merubah dari pengoperasian maju menjadi mundur. Pada kasus ini, menggunakan saklar pada rangkaian medan untuk melakukan perubahan secara mekanik selama pada prioda posisi diam. Makna penundaan waktu selama posisi diam, terhadap demagnetisasi medan pada arah mundur. Pada kebanyakkan aplikasi praktis untuk keduanya tidak dapat dikendalikan dan dikendalikan dengan penyearah *line-commutated*. Beberapa aplikasi dasar terdiri dari :

- Pengendali motor DC dengan *variable speed control*
- Sumber DC untuk *inverter variable voltage-variable frequency*
- Konverter pengembali *slip-energy* untuk motor induksi rotor lilit
- Sumber eksitasi DC untuk mesin DC
- Konverter tegangan tinggi DC

8. Inverter Gate-Commutated (Konverter Ac/Dc)

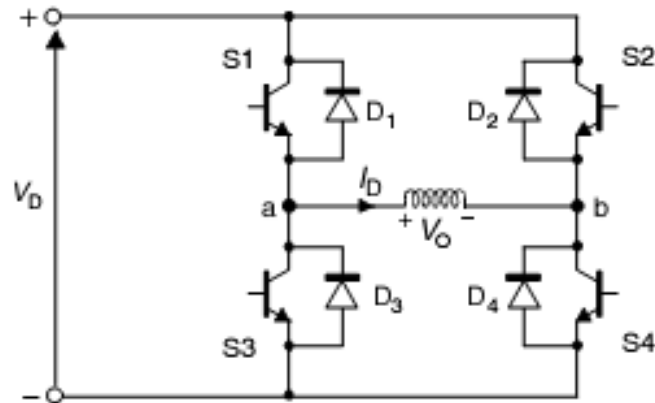
Kebanyakan AC VSD masa kini dengan batasan 1-500 kW berdasarkan pada peralatan gate-commutated seperti GTO, MOSFET, BJT dan IGBT, yang mana dapat di ON dan OFF dengan rangkaian kontrol daya rendah yang dihubungkan pada gerbang kontrol komponen diatas.

Prinsip operasinya, inverter bekerja pada sumber tegangan DC yang menghasilkan keluaran variabel frekuensi AC. Dapat juga dioperasikan sebagai inverter gelombang langkah atau inverter PWM.

Pada inverter gelombang langkah, transistor sebagai saklar dengan perbedaan phasa 60^0 dan masing-masing transistor dijaga untuk 180^0. Variasi output bentuk gelomban frekuensi AC, selama antara transitor berubah menjadi ON. Output tegangan AC bervariasi dengan perubahan tegangan input DC. Inverter jenis ini mempunyai masalah pada torsi pulsa yang menjadi harmonik pada tegangan output. Yang memberikan gerakan pulsa pada rotor dengan kecepatan rendah.

Pulsa torsi dapat dieliminasi dengan menggunakan *pulse width modulation* (PWM) jenis inverter seperti ini outputnya memiliki konten harmonik rendah. Detailnya jenis inverter ini akan dijelaskan pada bab ini. Dengan sumber DC dan saklar elektronika daya, ini tidak memungkinkan didapatkan tegangan sinusiodal murni pada beban. Dengan cara yang lain, ini dapat memungkinkan untuk membangkitkan mendekati arus sinusiodal. Oleh sebab itu, bahwa arus yang mengalir pada rangkaian induktif harus memdekati arus sinusioda yang memungkinkan.

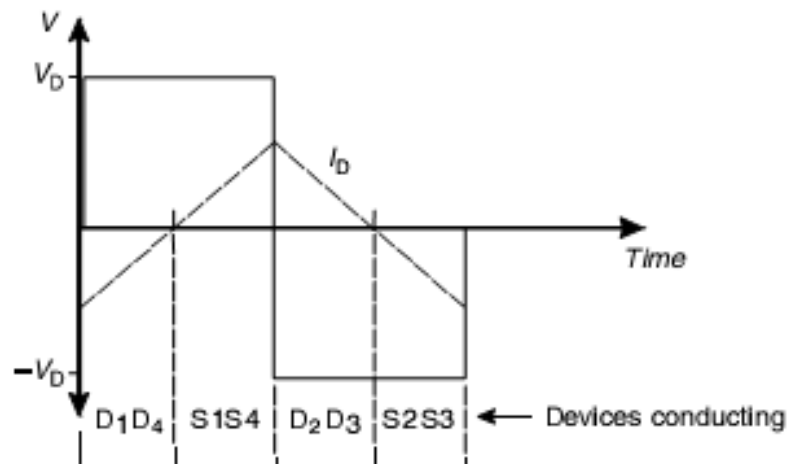
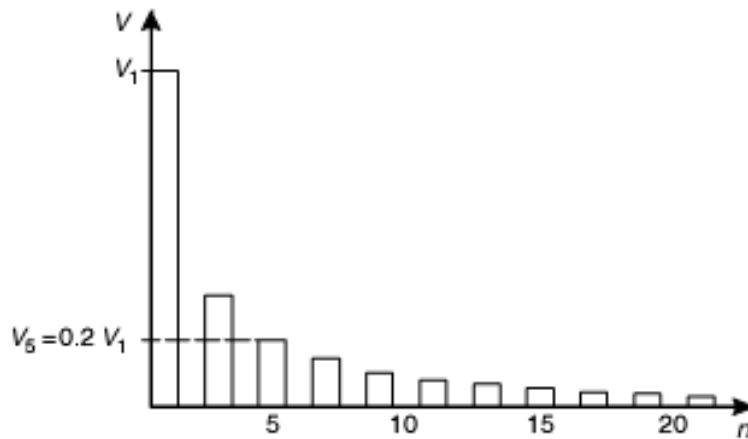
8.1 Inverter gelombang kotak satu-phase

Prinsip rangkaian *inverter gate-controlled*, ditunjukan pada gambar 2.34 yang terdiri dari empat semikonduktor daya yang mensuplai beban induktif.

Gambar 2.34 Inverter AC

Rangkaian ini dapat dianggap sebagai sakalar elektronik balik, yang mana tegangan DC input dapat dihubungkan pada beban induktif dengan cara sebagai berikut :

1. S1 = on, S4 = on ..... memberikan + V_D pada beban
2. S2 = on, S3 = on ..... memberikan – V_D pada beban
3. S1 = on, S2 = on ..... memberikan tegangan nol pada beban
4. S3 = on, S4 = on ..... memberikan tegangan nol pada beban
5. S1 = on, S3 = on ..... memberikan kesalahan hubung singkat
6. S2 = on, S4 = on ..... memberikan kesalahan hubung singkat

Walaupun demikian, keempat saklar dapat dikontrol untuk memberiakan bentuk gelombang kotak pada beban induktif, seperti yang ditunjukan pada gambar 2.35. Disini menggunakan konfigurasi pensaklaran (1) dan (2), tetapi bukan konfigurasi (3) atau (4). Secara jelas, untuk keselamatan pengoperasian yang berkelanjutan, opsi ke (4) harus selalu dihindari. Pada kasus ini secara murni beban induktif, bentuk gelombang arus adalah bentuk gelombang segitiga, seperti yang ditunjukan pada gambar 2.35. Pada bagian pertama siklus, arus negatif melalui saklar S1 dan S4 yang terhubung. Sebab kebanyakan komponen elektronika daya tidak dapat konduk secara negatif, untuk menghindari bahaya pensaklaran, arus negatif ini akan dialihkan.

Oleh sebab itu, biasanya dipakai dioda, anti paralel dengan pensaklaran untuk mengalirkan arus terus. Dioda tersebut kadang-kadang disebut reaktif atau *freewheeling* dioda. Dioda tersebut konduk jika polaritas tegangan dan arus berlawanan. Ini akan mengakibatkan jika arah-mundur aliran daya kembali ke sumber tegangan DC. Output frekuensi gelombang kotak priodik disebut frekuensi dasar. Menggunakan analisis Fourier, beberapa bentuk gelombang berulang-ulang dapat ditetapkan kedalam jumlah bentuk gelombang sinusiodal. Masing-masing mencakup satu sinusiodal pada frekuensi dasar dan jumlah harmonik sinusiodal pada frekuensi tinggi, yang mana lebih dari satu frekuensi dasar. Spektrum harmonik untuk output gelombang kotak seperti yang ditunjukan pada gambar 2.36. Dengan menaikan frekuensi, amplitude tegangan harmonik turun dengan cepat.

Gambar 2.35. Modulasi bentuk gelombang kotak.

Gambar 2.36. Spektrum harmonik gelombang kotak.

Nilai RMS komponen tegangan sinusiodal dasar adalah :

$$V_1 = 2\frac{\sqrt{2}}{\pi}V_d \quad V$$

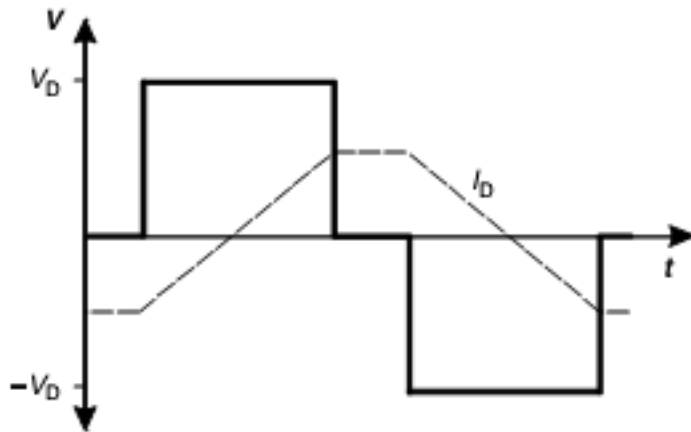
Nilai RMS n tegangan harmonik :

$$V_n = \frac{V_1}{n} \qquad V$$

Dari ilustrasi ini bahwa output tegangan gelombang kotak, mempunyai banyak komponen yang belum diketahui seharusnya magnitude yang besar pada frekuensi dasar. Arus yang mengalir pada beban yang disebabkan oleh distorsi tegangan output, sebagaimana yang didemontrasikan oleh bentuk gelombang arus non-sinusiodal. Contoh ini, arus yang memiliki bentuk segitiga.

Jika tegangan gelombang kotak yang ditunjukan terhadap motor induksi satu phasa, motor akan bekerja pada frekuensi gelombang kotak. Keadaan komponen linier (induktif/resistif beban), bagaimanapun juga, ini akan tergambar arus non-sinusiodal dan

akan menahan penambahan panas yang diakibatkan arus harmonik. Arus tersebut dapat juga membangkitkan pulsa torsi. Untuk merubah kecepatan motor, frekuensi dasar dari output inverter dapat dirubah dengan mengatur pensaklaran kecepatan. Untuk menaikan frekuensi, pensaklaran kecepatan dapat dinaikan, dan untuk menurunkan frekuensi, pensaklaran kecepatan dapat diturunkan.

Magnitude tegangan output dapat juga dikontrol. Tegangan output inverter rata-rata dapat diturunkan dengan memasukan prioda tegangan nol, menggunakan saklar konfigurasi (3). Masing-masing setengah siklus yang terdiri dari pulsa kotak, yang hanya bagian dari setengah prioda, seperti yang ditunjukan dalam gambar 2.37.

Gambar 2.37. Modulasi gelombang kotak dengan pengurangan lebar tegangan pulsa.

Proses perubahan lebar pulsa, untuk mengurangi nilai rata-rata RMS dari bentuk gelombang disebut PWM. Contoh gambar 2.38 phasa tunggal, PWM memungkinkan untuk mengontrol nilai RMS tegangan output. Komponen dasar tegangan sinusiodal adalah secara kontinue berubah dengan batasan sebagai berikut :

$$Zero - 2\frac{\sqrt{2}}{\pi}V_D \qquad V$$

Spektrum harmonik disini bentuk gelombang dimodifikasi tergantung dari bagian dari pulsa tersebut, gelombang kotak penuh, tetapi secara umum sama dengan bentuk gelombang yang ditunjukan sebelumnya.

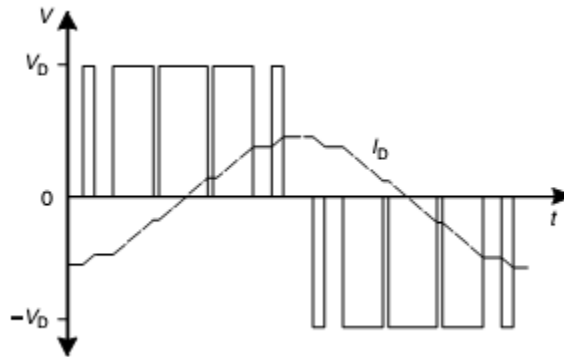
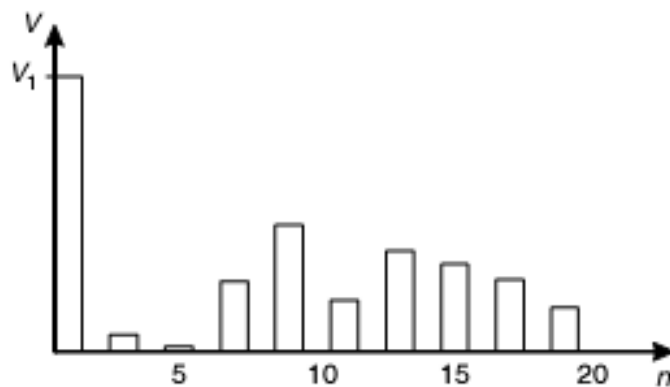
8.2 Inverter modulasi lebar pulsa (PWM) phasa tunggal

Berdasarkan fakta bahwa sumber tegangan stator pada motor induksi AC, adalah gelombang kotak dan ini menimbulkan distorsi dengan sendirinya terhadap motor. Masalah utama datang dari distorsi bentuk gelombang arus, yang menghasilkan kerugian tembaga dan mengakibatkan denyutan torsi pada poros motor. Salah satu output inverter yang ideal, menghasilkan bentuk gelombang arus pada distorsi harmonik yang rendah.

Motor induksi AC secara dominan adalah induktif, dengan reaktansi tergantung pada frekuensi ($X_L = j2\pi fL$). Disini, oleh sebab itu, bermanfaat jika distorsi tegangan harmonik dapat mendesak kedalam frekuensi tinggi, dimana impedansi motor tinggi dan tidak banyak arus distorsi yang akan mengalir.

Salah satu teknik untuk merealisasikan ini adalah modulasi pelebaran pulsa kode sinus (sine-PWM). Peralatan daya yang diperlukan sebagai pensaklaran, pada frekuensi tertentu harus lebih besar dari frekuensi dasar, yang menghasilkan sejumlah pulsa, untuk masing-masing bagian prioda output yang dihendaki. Pulsa dari suatu frekuensi disebut frekuensi modulasi.

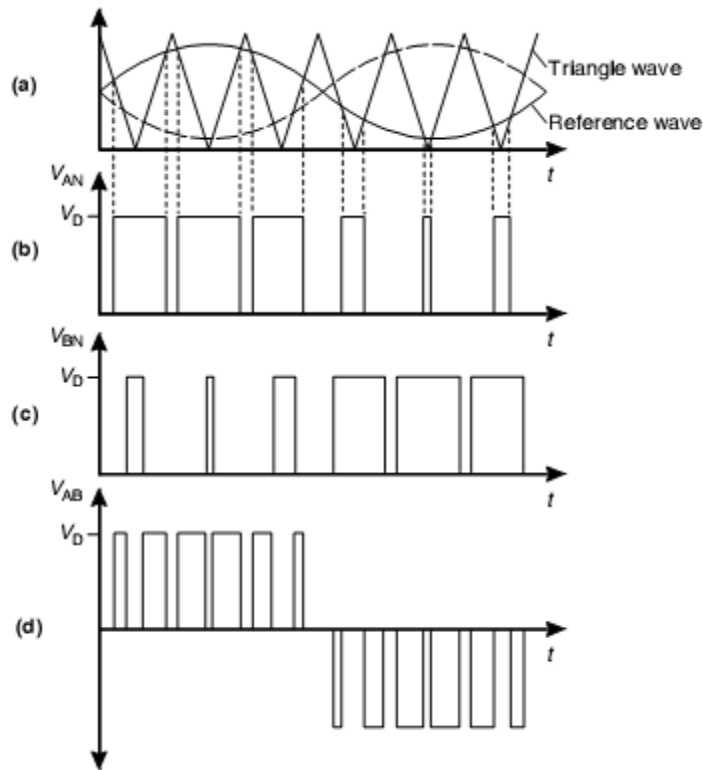
Lebar pulsa berbeda untuk seluruh siklus sinusioda, menghasil bentuk gelombang tegangan seperti yang ditunjukan pada gambar 2.38, pada gambar tersebut juga ditunjukan bentuk gelombang arus untuk beban induktif, dengan peningkatan bentuk gelombang.

Peningkatan bentuk gelombang arus dapat dijelaskan dengan spektrum harmonik seperti yang ditunjukan pada gambar 2.39. Dari sini dapat kita lihat bahwa, bentuk gelombang tegangan seluruhnya masih banyak komponen distrosi, terjadi frekuensi harmonik yang tinggi, dimana beban impedansi yang tinggi pada motor efektif untuk menurunkan arus.

Gambar 2.38 Tegangan dan arus PWM kode sinus

Gambar 2.39. Spektrum harmonik untuk inverter PWM.

Kenaikan modulasi frekuensi akan memperbaiki bentuk gelombang arus, tetapi kerugianya pada pembiayaan peralatan pensaklaran inverter naik, pemilihan frekuensi modulasi tergantung pada jenis peralatan pensaklaran dan frekuensi. Dengan *inverter thyristor force-commutated*, frekuensi modulasi frekuensi naik menjadi 1 kHz adalah

memungkinkan dengan menggunakan teknologi lama. Dengan dikenalkannya GTOs dan BJTs, dapat dinaikan sekitar 5 kHz. Dengan IGBTs, frekuensi modulasi akan menjadi tinggi sampai 20 kHz.

Pada prakteknya, modulasi frekuensi maksimum diatas 12 kHz berdasarkan pada inverter IGBT kira-kira ukuran motor 22 kW dan 8 kHz untuk motor 500 kW. Pemilihan modulasi frekuensi didasarkan pada kerugian antara motor dan inverter. Pada modulasi frekuensi rendah, kerugian pada inverter rendah dan pada motor tinggi. Pada modulasi frekuensi, kerugian pada inverter naik, dimana pada motor turun.

Salah satu teknik dasar untuk merealisasikannya inverter PWM kode sinus merupakan metoda persilangan sinus-segitiga seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.40. Bentuk gelombang segitiga gigi gergaji dibangkitkan dari rangkaian kontrol yang dikehendaki pada inverter pensaklaran frekuensi. Disini merupakan perbandingan pada suatu komparator, dengan acuan sinyal sinusioda, yang mana sama dengan frekuensi dan sebanding dengan magnitudenya bahwa tegangan output sinusioda sesuai dengan yang dikehendaki. Tegangan V_{AN} (gambar 2.40 b) pesaklaran cepat kapanpun acuan bentuk gelombang lebih bagus bentuk gelombang segitiga. Tegangan V_{BN} (gambar 2.40 c) tidak dapat dikontrol dengan bentuk gelombang segitiga yang sama tetapi dengan penggeseran bentuk gelombang 180^0.

Gambar 2.40 Prinsip PWM dengan segitiga persilangan.

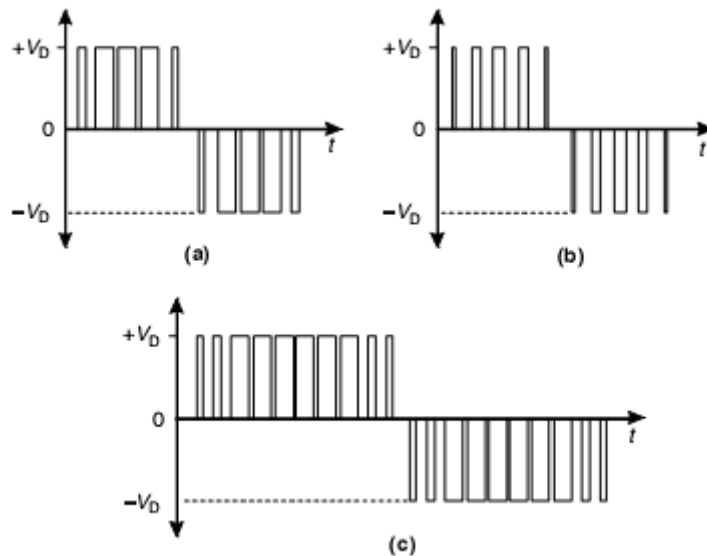
Pada kenyataannya tegangan output phasa ke phasa adalah V_{AB} (gambar 2.40 d), yang mana perbedaan antara V_{AN} dan V_{BN}, terdiri dari pulsa seri, masing-masing memiliki lebar yang berhubungan terhadap nilai acuan gelombang sinus pada waktu tertentu. Jumlah pulsa tegangan output V_{AB} adalah dua kali lipat tertinggal dari tegangan V_{AN}. Contoh pensaklaran inverter 5 kHz harus membangkitkan distorsi pensaklaran pada 10 kHz dengan tegangan output phasa ke phasa. Polaritas tegangan secara alternatif positif dan negatif pada frekuensi output yang dikehendaki.

Disini dapat pula dilihat bahwa acuan gelombang sinus pada gambar 2.40 merupakan komponen DC yang diberikan bahwa pulsa yang dibangkitkan dengan teknik mempunyai lebar positif. Ini ditunjukan dengan masing-masing tegangan DC yang tertinggal seperti yang ditunjukan pada gambar 2.40 a dan c. Bagaimanapun juga,

masing-masing ketertinggalan sama dengan tegangan DC yang menghilang dari tegangan beban.

Teknik dengan menggunakan segitiga-sinus persilangan adalah secara khusus sesuai untuk rangkaian kontrol analog, dimana dua acuan bentuk gelombang merupakan sumber pada komparator dan output komparator yang digunakan sebagai pemicu pensaklaran inverter. Pengoperasian secara teknik digital masa kini yang didasarkan pada algoritma pensaklaran. Contoh dengan membangkitkan pulsa pemicu yang proporsional terhadap bagian bawah gelombang sinus.

Akhir-akhir ini, pabrikan telah mengembangkan sejumlah perbedaan alogoritma untuk mengoptimalkan penampilan bentuk gelombang output pada motor induksi AC. Teknik tersebut menghasilkan output bentuk gelombang PWM, yang sama seperti yang ditunjukan pada gambar 2.40. Bentuk gelombang tegangan PWM kode-sinus adalah gabungan gelombang kotak frekuensi tinggi pada pulsa frekuensi (pembawa pensaklaran) dan variasi lebar sinusioda (modulasi bentuk gelombang). Disini dapat diketahui bahwa, untuk distorsi harmonik yang rendah, modulasi bentuk gelombang harus sinkron dengan frekuensi pembawanya, sehingga terdiri dari sejumlah integral prioda pembawa.

Ini diperlukan menjadi sedikit penting dengan frekuensi pembawa yang tinggi lebih dari dua puluh kali modulasi frekuensi. Tegangan dan frekuensi bentuk gelombang PWM sinusioda merupakan variabel perubahan bentuk gelombang acuan pada gambar 2.40 a, output yang dihasilkan seperti yang ditunjukan pada gambar 2.41.

Gambar 2.41. Variasi frekuensi dan tegangan dengan PWM sinusioda.

Gambar 2.41a menunjukan kasus dasar, dengan nilai perbandingan V/f. Gambar 2.41b menunjukan kasus dimana tegangan acuan setengahnya, menghasilkan masing-masing pulsa setengahnya. Gambar 2.41c menunjukan kasus dimana frekuensi acuan setengahnya, menghasilkan pelebaran modulasi lebih dari dua kali sejumlah pulsa.

Besar tegangan dengan PWM kode sinus terjadi bila pulsa ditengah melebar, menghasilkan output dengan tegangan puncak sama dengan sumbernya.

Indek Modulasi

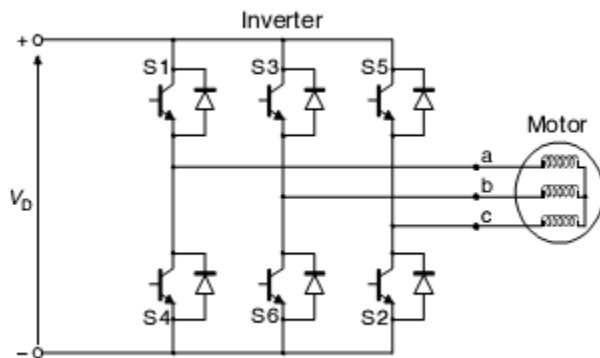
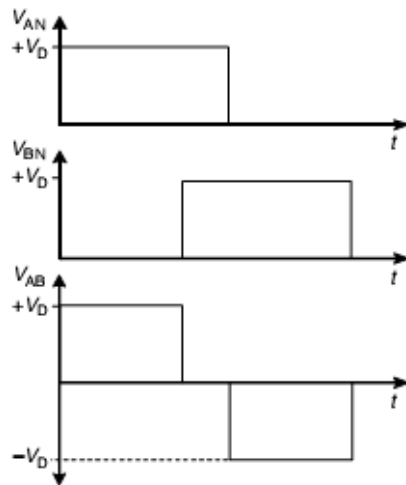
Disini mendifinisikan perbandingan AC puncak output dengan sumber DC. Jadi, besarnya tegangan output terjadi bila indek modulasi 1.

Ini memungkinkan dapat mencapai nilai indek modulasi tinggi dengan mengabaikan PWM sinus dan dengan menambahkan beberapa distrosi terhadap tegangan sinusioda acuan. Hasilnya beberapa pulsa ditengah-tengah bagian positf dan negatif bentuk

gelombang tereliminasi. Proses ini disebut pengurangan pulsa. Batasannya, tegangan bentuk gelombang kotak dapat dicapai dengan indek modulasi 1.

8.3 Inverter Tiga Phasa

Inverter tiga phasa harus dibangun dari jenis tiga inverter seperti yang ditunjukan sebelumnya. Bagaimanapun juga, lebih ekonomis menggunakan inverter jembatan enam-pulsa seperti yang ditunjukan pada gambar 2.42.

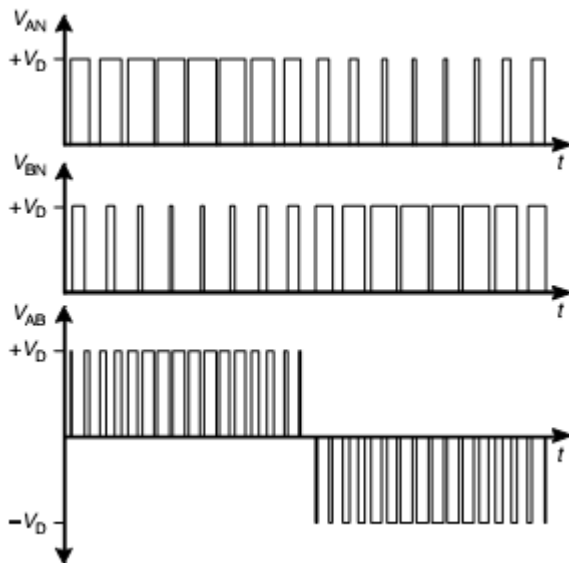
Bentuk sedehana seperti ini, tegangan output bentuk gelombang kotak dapat diperoleh dengan pensaklaran pada masing-masing untuk setengah prioda dan untuk setengah prioda berikutnya, pada saat waktu yang bersamaan dipastikan bahwa masing-masing phasa bergeser sepertiga prioda (120^0), seperti yang ditunjukan pada gambar 2.43.

Gambar 2.42 Inveret tiga phasa menggunakan gate-controlled switches.

Gambar 2.43. Output modulasi gelombang kotak-kuasi.

Bentuk gelombang tegangan phasa ke phasa yang dihasilkan terdiri dari pulsa kotak seri yang melebar merupakan dua-tiga priode pensaklaran, pada masing-masing phasa.

Bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan disebut tegangan gelombang kotak-kuasi (*quasi-square wave*). Teknik sederhana ini telah digunakan sebagai sumber tegangan inverter (*voltage source inverter*), dengan menggunakan *force commutated thyristor* pada inverter jembatan. Untuk menjaga perbandingan V/f tetap, magnitude tegangan DC pada penyearah dikontrol, selain itu menetapkan perbandingan frekuensi output, yang dikontrol dengan inverter jembatan. Teknik ini juga diketahui sebagai *pulse amplitude modulation* (PAM).

Tegangan ouput konverter tiga phasa mempunyai spektum harmonik, sama dengan gelombang kotak satu-phasa, terkecuali bahwa harmonik ketiga (harmonik yang frekuensinya tiga kali frekuensi dasar) telah dihapus. Pada inverter dengan output tiga-phasa, yang berarti bahwa harmonik ke 3, ke 9, ke 15, ke 21 dst dihapus. Untuk membangkitkan tegangan output AC tiga-phasa pada frekuensi yang spesifik, tegangan

V_{AN}, V_{BN}, V_{CN} pada ketiga terminalo utput a, b, dan c gambar 2.42 dapat dimodulasi dengan mengontrol on dan off keduanya tegangan dan frekuensi.

Perbandingan lebar pulsa yang melebihi prioda dapat berubah menurut algoritma PWM kode-sinus (gambar 2.44).
Bila tegangan phasa phasa V_{AB} terbentuk, menunjukan trategi modulasi yang diberikan hanya pada pulsa positif untuk setengah prioda dilanjutkan dengan pulsa negatif untuk setengah prioda, kondisi ini diketahui sebagai polaritas pulsa tetap. Ini dapat menunjukan bahwa polaritas pulsa tetap menjamin rendahnya distorsi harmonik, kebanyakan distorsi dimulai pada pemotongan kedua frekuensi inverter. Oleh karena itu, jenis inverter ini digunakan pada aplikasi industri. Metoda yang sama juga digunakan pada pengendali AC.

Gambar 2.44. Bentuk gelombang tegangan output PWM kode-sinus tiga phasa.

3. Kegiatan Belajar 3:

Sistem VFD

Indikator Keberhasilan :

Setelah menyelesaikan kegiatan belajar ini, diharapkan peserta mampu menjelaskan sistem VFD, manfaat pemakaian VFD dan keunggulannya.

3.1 Pendahuluan

Variable Frequency Drive (VFD) adalah sebuah peralatan yang dapat mengendalikan tegangan dan frekuensi listrik yang akan disuplaikan ke motor listrik,sehingga dapat mengendalikan kecepatan motor tersebut dan sistem yang sedang di *drive*-nya, bekerja sesuai dengan kebutuhan proses, maka efisiensi sistem dapat ditingkatkan.

Sebuah VFD mampu mengatur kecepatan dan torsi pada suatu motor induksi.
Suatu VFD menyediakan kebutuhan untuk *continuous range process speed control.*
VFD memiliki banyak nama lain, seperti *Variable Speed Drive* (VFD), *Adjustable Speed Drives* (ASD), atau *Inverter*.
Sistem VFD terdiri dari VFD itu sendiri dan motor listrik.

3.2 Kontrol Kecepatan Motor

Motor Induksi AC (*Alternating Current*) adalah mesin dengan kecepatan konstan, dengan variasi kecepatan dari tanpa beban ke beban penuh berkisar 2 – 5%, merepresentasikan ―slip” dari motor tersebut.
Kecepatan dari mesin tersebut ditentukan oleh frekuensi (f) suplai daya dan jumlah kutub (P) magnet pada statornya.
Ditentukan melalui persamaan :

$$N_s = (120.f)/P$$

$$\text{Slip (s)} = [(N_s - N_r)/N_s] \times 100\%$$

Dimana : N_s = kecepatan sinkron (RPM)

N_r = kecepatan rotor (RPM)

f = frequensi jala-jala (Hz)

P = Jumlah Kutub (*poles*)

Sebagian besar aplikasinya motor dengan kecepatan tetap (*fixed*) lebih banyak digunakan. Pada aplikasi atau sistem seperti ini, elemen kontrol seperti damper dan valve digunakan untuk meregulasi aliran (*flow*) dan tekanan (*pressure*).Peralatan ini biasanya menyebabkan operasi yang tidak efisien serta pemborosan energi karena aksi pembukaan dan penutupan mereka.

Bagaimanapun, sering sangat dibutuhkan sebuah motor yang dapat beroperasi pada dua atau lebih kecepatan, atau malahan pada operasi *full variable speed*. Elemen kontrol konvensional dapat diganti dengan menerapkan operasi *variable speed* menggunakan suatu VFD.

Banyak sekali penghematan energi yang dapat dicapai pada berbagai aplikasi dengan memvariasikan kecepatan motor dan beban yang di *drive*-nya dengan menerapkan VFD yang tersedia secara komersial. Penghematan termasuk dari segi *capital cost* dan biaya perawatan berkaitan dengan elemen kontrol ini.

Tabel berikut ini menunjukkan contoh-contoh beban dan kemungkinan penghematan energinya.

Tabel 3.1 Tipe beban, aplikasi dan penghematan energi

Tipe Beban	Aplikasi	Pertimbangan tentang Energi
Beban torsi bervariasi - Daya bervariasi pada nilai pangkat tiga dari kecepatan. - Torsi bervariasi pada nilai pangkat dua dari	- Fan sentrifugal - Pompa sentrifugal - Blower - Sistem HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning)*	Pada kecepatan rendah terjadi penghematan energi yang signifikan sebagai akibat penurunan daya motor

kecepatan.		yang sebanding dengan pangkat tiga penurunan kecepatan.
Beban torsi tetap - Torsi tetap pada kecepatan motor yang bervariasi. - Daya bervariasi secara langsung dengan kecepatan.	- Mixer - Conveyor - Kompresor - *Printing Presses*	Pada kecepatan rendah terjadi penghematan energi yang berbanding lurus dengan penurunan kecepatan.
Beban daya tetap - Membangkitkan daya yang sama pada setiap kecepatan. - Perubahan torsi berbanding terbalik dengan perubahan kecepatan.	- Peralatan-peralatan mesin - Mesin bubut - Mesin-mesin penggilingan - *Punch presses*	Tidak ada penghematan energi pada penurunan kecepatan; akan tetapi, penghematan energi dapat dicapai dengan mengoptimasi kecepatan pemotongan dan permesinan untuk produk yang sedang diproduksi

3.3 Karakteristik Beban yang di *Drive* dan Kebutuhan Daya

Perilaku dari torsi dan daya (*horsepower*) beserta kecepatan (RPM) menentukan kebutuhan dari sistem *motor-drive*.

*Horsepower = RPM * Torsi (ft-lb) / 5250*

1 horsepower (HP) = 746 Watts = 0.746 kWatts

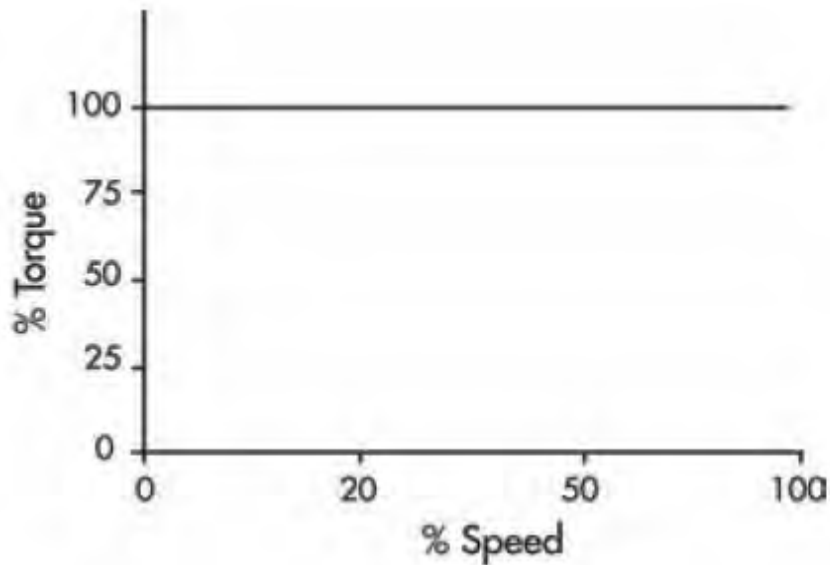
maka:

*Daya (kW) = RPM * Torsi (Nm) / 9550*

Persamaan torsi diatas menyiratkan bahwa torsi berbanding lurus dengan nilai daya dan berbanding terbalik dengan kecepatan (RPM).

Kita dapat mengkategorikan aplikasi-aplikasi *drive*berdasarkan kebutuhan torsi operasionalnya:

- Torsi beban tetap
- Daya beban tetap
- Torsi beban bervariasi (*variable torque loads*) dimana torsi adalah jumlah gaya yang dibutuhkan beban untuk berotasi pada porosnya.
- Efisiensi motor listrik dan *drives*

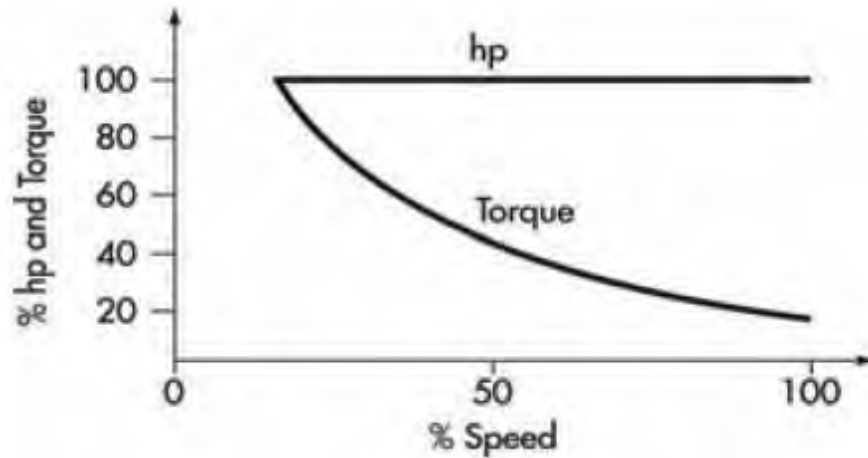
Torsi beban tetap

Gambar 3.1. Torsi beban tetap

Torsi beban tetap meskipun terjadi perubahan kecepatan.Dengan demikian daya yang dibutuhkan adalah berbanding lurus dengan perubahan kecepatan putaran motor. Contoh-contoh tipikal aplikasi untuk torsi tetap adalah:

- *Conveyor*
- *Extruder*
- *Mixer*
- *Positive displacement pump and compressor*

Beberapa keuntungan aplikasi VFD dengan torsi tetap adalah pengendalian kecepatan dan *starting* serta *stopping* dengan percepatan / perlambatan secara presisi.

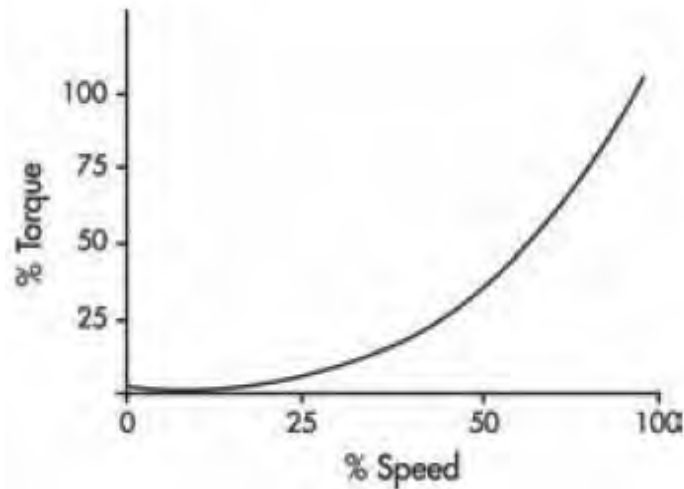
Tipikal kisaran kecepatan untuk beban torsi tetap adalah 10:1.Aplikasi ini umumnya menyebabkan penghematan energi sedang pada kecepatan rendah.

Daya (*horsepower*) beban tetap

Gambar 3.2. Daya beban tetap

Tipe kedua dari karakteristik beban adalah daya tetap.Pada aplikasi ini kebutuhan torsi bervariasi secara berlawanan dengan kecepatan (torsi tinggi maka kecepatan rendah, begitupun sebaliknya).Ketika torsi bertambah maka kecepatan harus menurun untuk mendapatkan beban daya tetap. Hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

*Daya = kecepatan * torsi * tetapan*

Contoh-contoh untuk tipe beban ini adalah pada mesin bubut atau pengeboron dan mesin penggilingan dimana dibutuhkan pemotongan berat pada kecepatan rendah dan pemotongan cepat ringan pada kecepatan tinggi.Aplikasi ini tidak menawarkan penghematan energi pada penurunan kecepatan.

Beban torsi bervariasi

Gambar 3.3. Beban torsi bervariasi

Tipe ketiga dari karakteristik beban adalah beban torsi bervariasi. Contohnya *Centrifugal fans, blowers* dan pompa. Penggunaan VFD dengan beban torsi bervariasi memberikan penghematan energi yang signifikan.

Pada aplikasi ini:

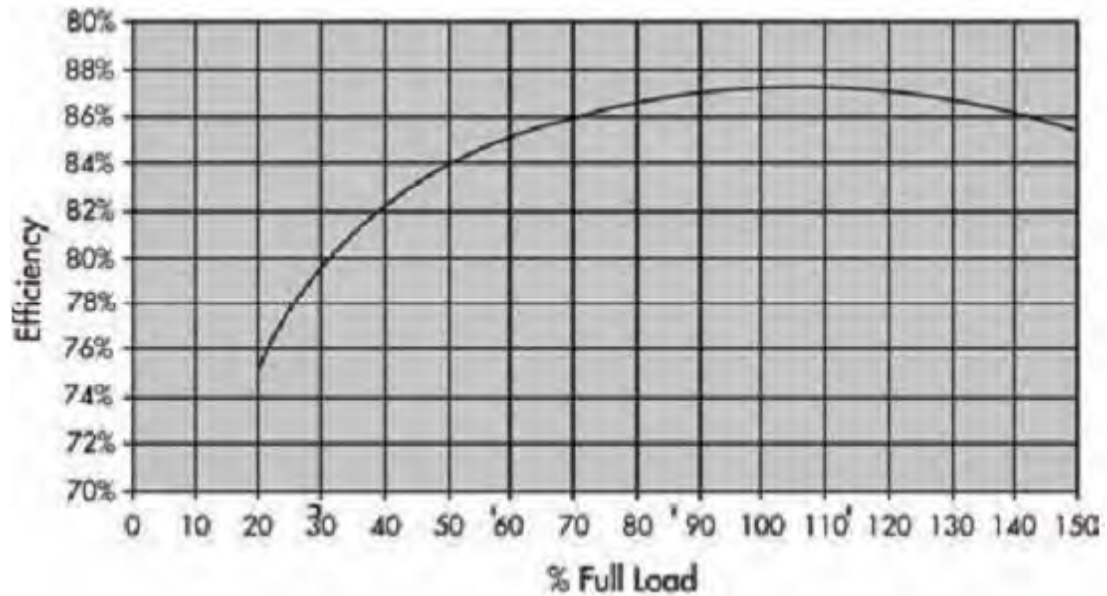
- Torsi bervariasi secara lansung dengan kuadrat kecepatan.
- Daya bervariasi secara langsung dengan pangkat tiga kecepatan.

Ini berarti pada kecepatan setengah (½), daya yang dibutuhkan adalah sekitar seperdelapan (1/8) dari nilai maksimum.

Sebuah VFD mereduksi total energi yang masuk ke sistem jika tidak dibutuhkan.

Efisiensi motor listrik dan *drives*

Efisiensi dari motor listrik AC pada beban penuh berkisar pada nilai 80% untuk motor-motor kecil ke nilai lebih dari 95% untuk motor berdaya lebih dari 100 HP. Efisiensi sebuah motor listrik menurun signifikan seiring dengan penurunan beban dibawah 40%. Maka disarankan bahwa motor yang digunakan dapat beroperasi

pada beban penuh dengan nilai daya 75% dari nilai daya motor. Gambar 3.4.mununjukkan tipikal kurva efisiensi motor vs. pembebanan.

Gambar 3.4. Tipikal efisiensi dari motor induksi standar 10 HP efisiensi vs. beban

Efisiensi motor listrik dan sistem *drive* adalah rasio dari daya *output* mekanik dengan *input* daya dan umumnya direpresentasikan dalam persentase.

Efisiensi sistem motor = (Output(mekanik)/Input(electrical)) * 100%

Sebuah VFD sangat efisien.Tipikal efisiensinya 97% atau lebih untuk beban penuh.Efisiensinya turun saat beban juga menurun. Secara khusus, VFD diatas 10

HP memiliki efisiensi lebih dari 90% untuk beban lebih besar dari 25% beban penuh.

Tabel 3.2 Efisiensi VFD

PWM VFD Efficiency as a Function of VFD Power Rating					
VFD HP rating	**Efficiency % Load, Percent of Drive Rated Power Output**				
	12.5	**25**	**50**	**75**	**100**
1	.48	.74	.84	.87	.89
5	.80	.88	.92	.94	.95
10	.83	.90	.94	.95	.96
25	.88	.93	.95	.96	.97
50	.86	.92	.95	.96	.96
75	.86	.94	.97	.97	.97
100	.89	.94	.96	.96	.97
200	.91	.95	.96	.97	.97

Tabel berikut menunjukkan efisiensi VFD pada beban yang bervariasi.

Efisiensi sistem lebih rendah daripada efisiensi produk motor dan VFD karena efisiensi motor bervariasi dengan beban dan karena adanya efek harmonik pada motor.

Sayangya, hampir tidak mungkin untuk mengetahui akan berapakah nilai efisiensi motor/*drive*, tetapi karena daya input ke sebuah sistem torsi bervariasi (*variable torque*) menurun sesuai dengan kecepatan, sehingga perkiraan dari efisiensi sistem adalah hal yang dapat dilakukan.

Ketika menghitung konsumsi energi dari sebuah sistem *motor drive*, tetapkan efisiensi sistem pada range 80 – 90 % untuk motor 10 HP atau lebih dan beban 25% atau lebih.

Pada umumnya, area efisiensi yang rendah berkorespondensi untuk motor ukuran kecil serta beban kecil dan area efisiensi tinggi berkorespondesi untuk motor ukuran besar serta beban besar.

3.4 Pemilihan VFD

Berikut adalah langkah-langkah pemilihan VFD:

- Menetapkan spesifikasi awal untuk aplikasi drive

  Untuk memilih kombinasi motor dan VFD yang tepat, informasi berikut sebaiknya tersedia:

  - Tegangan (Volt) dan frekuensi (Hz) sumber listrik.
  - Torsi *start* (Newton meters).
  - Torsi beban (Newton meters) dan hubungannya dengan kecepatan.
  - Rentang kecepatan (rev/min).
  - Nilai percepatan yang dibutuhkan.
  - Momen inersia motor dan beban (kgm^2).

- Pemilihan jumlah *pole* (kutub) motor

  Pemilihan jumlah *pole* ini berkaitan dengan pemilihan kecepatan putaran motor yang akan digunakan.

- Menentukan nilai daya (*power*) motor

  Nilai daya motor dihitung berdasarkan persamaan berikut

  Power = (Torsi (Nm) * kecepatan(rev/min)) / 9550 kW

  **torsi disini adalah torsi mekanik, dan kecepatan adalah kecepatan putaran*

- Langkah berikutnya adalah memilih VFD yang sesuai dengan spesifikasi kebutuhan.

  Dalam pemilihannya faktor-faktor berikut patut dipertimbangkan:

  - Tegangan dan frekuensi suplai listrik.
  - Nilai arus listrik motor.
  - *Duty type* (*Variable torque* atau *constant torque*).

  VFD yang dipilih memiliki nilai arus listrik yang lebih tinggi dengan nilai arus listrik motor.

3.5 Instalasi dan Pengawatann VFD

3.5.1 Instalasi VFD

3.5.1.1 Rekomendasi umum untuk keselamatan

Rekomendasi-rekomendasi dari pabrikan produsen VFD harus diikuti dengan cermat dan diimplementasikan.

VFD memiliki capasitor yang besar yang terhubung dengan *DC link* di dalam sistem VFD.Saat dimatikan, VFD harus dibiarkan beberapa saat sebelum mengerjakan sesuatu pada alat tersebut. Hal ini dilakukan untuk membiarkan capasitor *full discharge* (pengosongan penuh).

3.5.1.2 Area berbahaya

Secara umum, VFD tidak boleh dipasang pada daerah-daerah yang berkategori area berbahaya (*hazardous area*).

3.5.1.3 Kondisi-kondisi lingkungan untuk instalasi

VFD lebih sensitif terhadap kondisi lingkungan sekitarnya dan harus terletak pada lokasi yang terlindungi dari:

- Debu dan material-material kasar lainnya.
- Gas dan cairan yang bersifat merusak (*corrosive*).
- Gas dan cairan yang mudah terbakar.
- Kandungan uap air di udara yang tinggi.

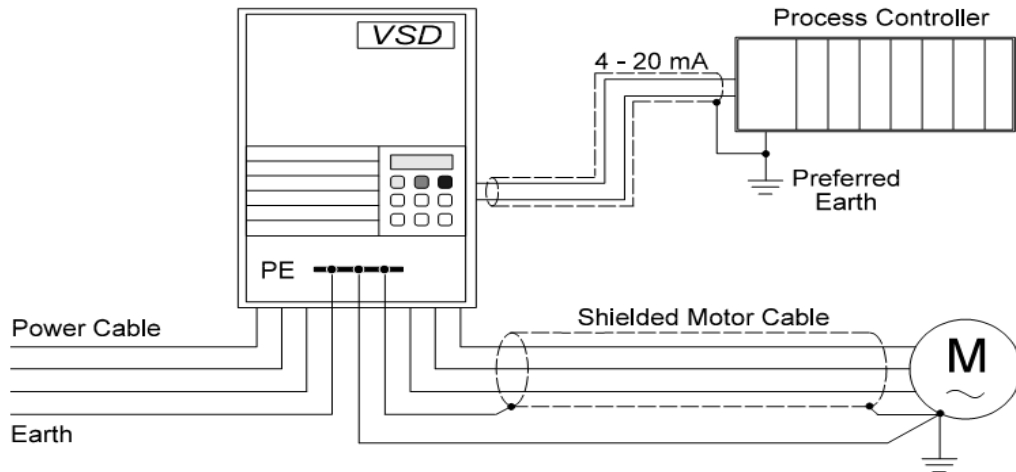
Ketika memasang VFD, batasan-batasan kondisi lingkungan berikut harus dipertimbangkan:

- Suhu lingkungan: $\leq$ 40 degC
- Ketinggian: $\leq$ 1000 meter di atas permukaan laut
- Kelembaban: $\leq$ 95%

3.5.2 Pengawatan VFD

Pengawatan VFD terbagi dua, yaitu pengawatan untuk *power* (daya) suplai listrik dan pengawatan kontrol VFD.

- Pengawatan *power* (daya) suplai listrik.

Berikut adalah rangkaian daya, motor dan pentanahan untuk aplikasi VFD.

Gambar 3.5. Diagram koneksi suplai daya, motor dan pentanahan

❖ Pengawatan kontrol untuk VFD

VFD dapat dikendalikan –secara lokal” melalui *push button, switches* dan potensiometer yang ada pada VFD tersebut.

Dalam aplikasi industri, tidaklah praktis untuk mengendalikan suatu VFD dilokasi ia dipasang. VFD biasanya dipasang di dalam MCCs (*Motor Control Centers*) yang berlokasi di *switchrooms*, umumnya dekat dengan sumber listrik, namun tidaklah dekat dengan operator yang mengendalikan proses.

Sehingga, kebanyakan VFD menyediakan terminal-terminal yang memungkinkan untuk pengendalian jarak jauh (*remote control*). VFD memiliki terminal kontrol sebagai berikut:

- *Digital inputs,* seperti *remote start, stop, reverse, jog,* dsb. Yang bisanya diimplementasikan oleh
  - *Remote push button* oleh sistem kontrol manual.
  - *Digital outputs* (DO) oleh *process controller* seperti PLC (*Programmable Control Logic*) dalam sistem kontrol otomatis.
- *Digital status outputs,* seperti indikasi *running*, *stopped, fault,* dsb, yang

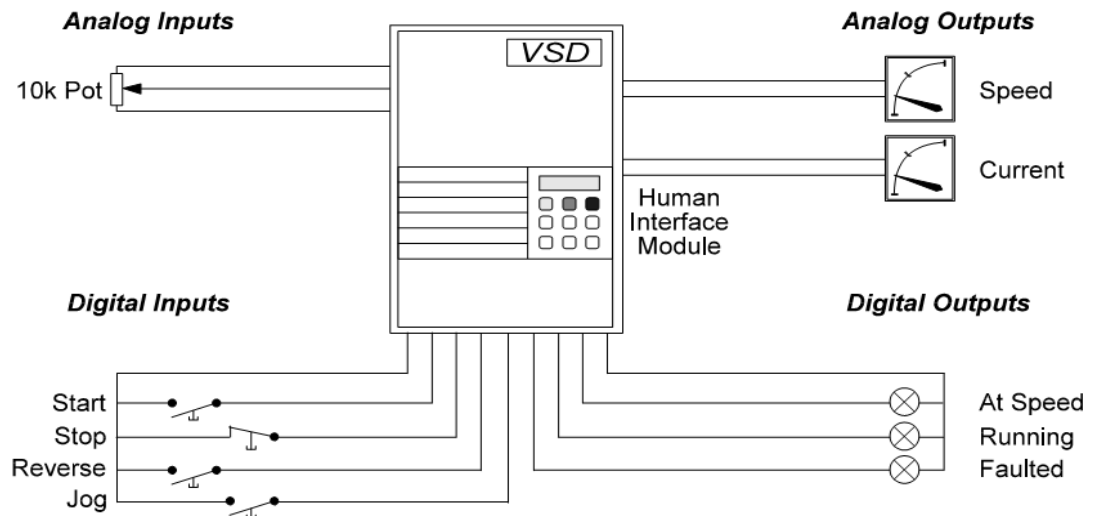
biasanya diterapkan oleh

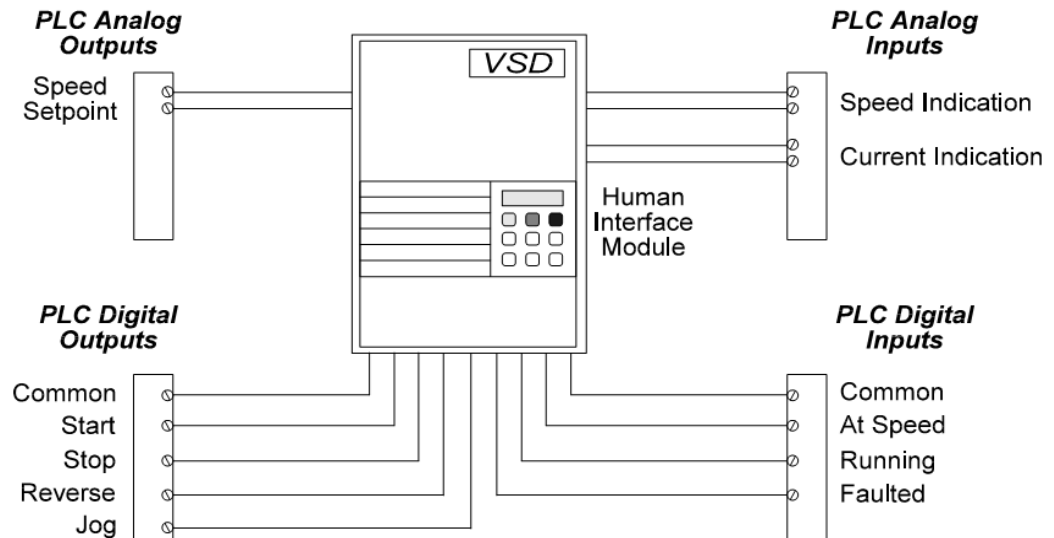
- *Remote alarm* dan lampu indikasi untuk sistem kontrol manual.
- *Digital inputs* (DI) untuk *process controller* seperti PLC dalam sistem kontrol otomatis.

➢ *Analog inputs*, seperti referensi kecepatan atau frekuensi, dsb, yang biasanya diimplementasikan oleh

- *remote*potensiometer (10 kohm) dalam sistem kontrol manual.
- *Analog outputs* (AO) dari suatu *process controller* seperti PLC dalam sistem kontrol otomatis, umumnya menerapkan sinyal arus 4 – 20 mA.

➢ *Analog outputs*, seperti *monitoring* kecepatan (*speed*), *monitoring* arus, dsb, yang biasanya diimplementasikan oleh

- *Remote display meters* (0 – 10 V) dalam sistem kontrol manual.
- *Analog inputs* untuk *process controller* seperti PLC dalam sistem kontrol otomatis, biasanya menggunakan sinyal arus listrik 4 – 20 mA.

Gambar 3.6. Tipikal konfigurasi hard-wired kontrol manual

Berikut adalah tipikal konfigurasi pengawatan pengendalian otomatis menggunakan PLC

Gambar 3.7. Tipikial konfigurasi pengawatan sistem kontrol otomatis dengan PLC

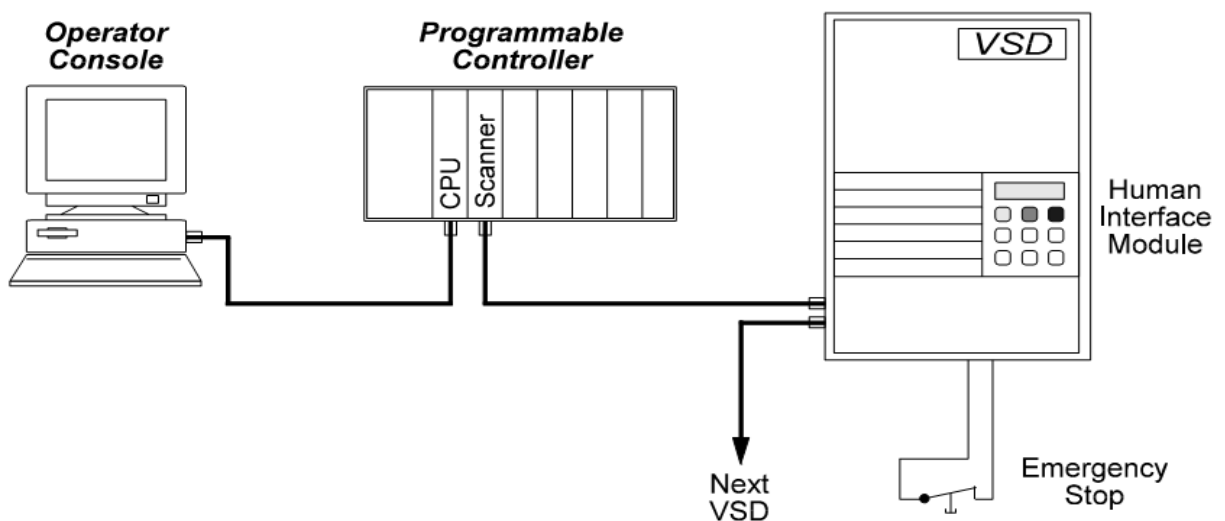
Dengan bertambah kompleksnya sistem dan semakin banyak informasi yang dibutuhkan dari sensor, maka jumlah kabel yang dibutuhkan akan semakin meningkat dan ini akan menambah permasalahan dalam hal biaya dan kompleksitas.

Antarmuka pengawatan VFD dengan PLC setidaknya membutuhkan 15 kabel dengan fungsi sebagai berikut:

- 5 kabel untuk kontrol seperti *start, stop, enable, reverse,* dsb.
- 4 kabel untuk status/*alarm*, seperti *running, fault,* dsb.
- 2 atau 3 kabel untuk *analog control,* seperti untuk *speed setpoin.*
- 4 kabel untuk status *analog*, seperti *speed indication, current indication.*

Jika ada sejumlah VFD dalam keseluruhan sistem, maka jumlah kabel yang dibutuhkan adalah jumlah kabel per VFD dikalikan dengan jumlah VFD dalam sistem.

Untuk mengatasi hal tersebut dapat diterapkan komunikasi serial untuk mengendalikan VFD secara *remote,* selain itu juga dapat dilakukan *setting* parameter VFD melalui komunikasi serial.

Berikut adalah tipikal konfigurasi sistem komunikasi serial VFD.

Gambar 3.8. Tipikal konfigurasi sistem komunikasi serial

LATIHAN

1. Jelaskan fungsi VFD dan manfaatnya !
   ……………………………………………………………………………………….
2. Jelaskan langkah-langkah pemilihan VFD !
   ……………………………………………………………………………………….
3. Bagaimana VFD bisa menghemat penggunaan energy dalam pengendalian motor?
   ………………………………………………………………………………………

TUGAS PRAKTEK

KONTROL VFD	**KARAKTERISTIK MOTORDENGANMENERAPKAN VFD**	**LEMBARAN KERJA-1**
Aplikasi VFD		**VFD/05/12**

Tujuan:

Setelah melakukan tugas praktek ini anda diharapkan mampu:

- Memahami karakteristik motor (kecepatan, daya, dan torsi) dengan menerapkan VFD.

Petunjuk:

1. Saat membangun rangkaian semua peralatan pada posisi OFF.
2. Catat data kapasitas motor dan pilih alat-alat ukur yang tepat berdasarkan jangkauan/batas nilai yang diukur.
3. Saat menghubungkan rangkaian ke sumber tegangan/uji coba system VFD minta persetujuan instruktur.
4. Ikuti dengan seksama langkah kerja, agar anda dan peralatan terhindar dari kecelakaan.

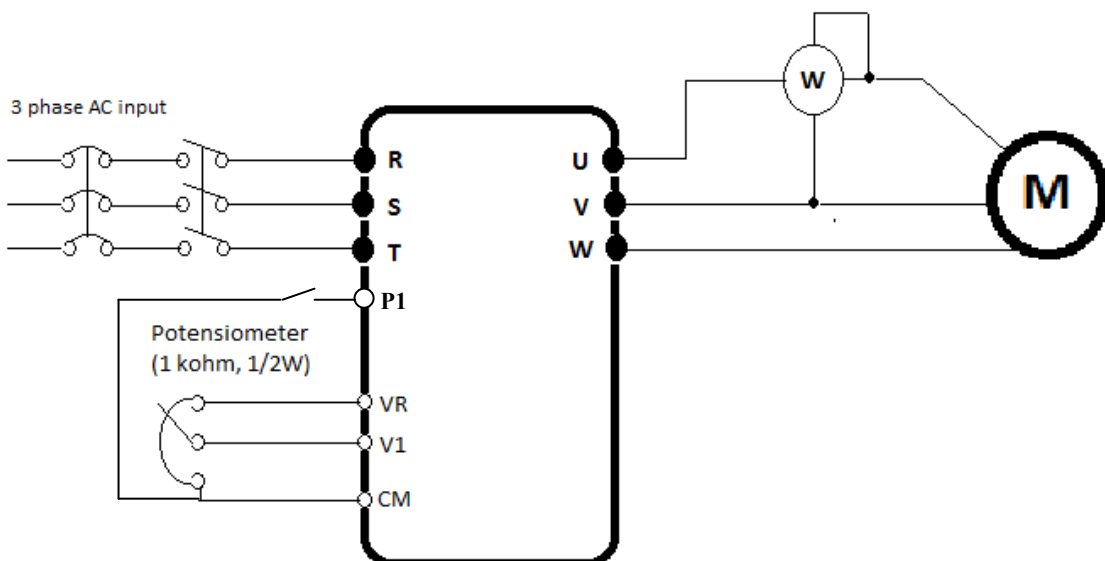
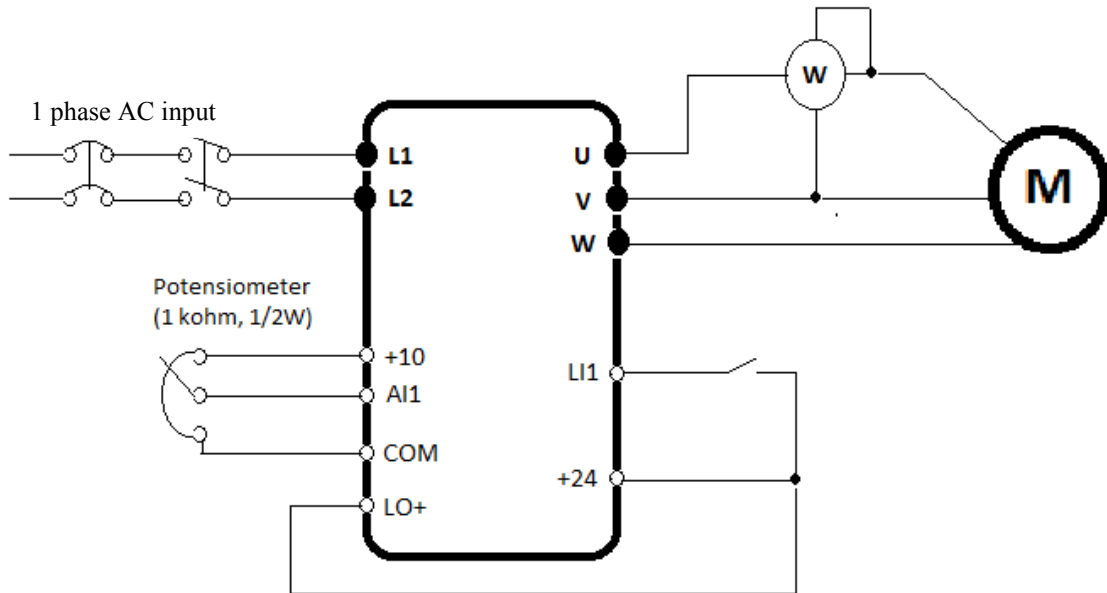
Alat dan Bahan:

1. Motor induksi 3 fasa 0,75 kW (1 HP)
2. VFD Altivar 18 atau LS IG5A
3. Watt – meter
4. Tachometer
5. Potensiometer
6. Kabel penghubung

Langkah Kerja:

1. Cermati gambar rangkaian dengan seksama, dan persiapkan bahan dan peralatan yang dibutuhkan.
2. Bangun rangkaian sesuai gambar percobaan, setelah selesai dan disetujui instruktur, sambungkan rangkaian ke tegangan sumber.
3. Amati penunjukan Watt - meter dan nilai frekuensi keluaran VFD ke motor listrik.
4. Atur putaran motor dengan mengatur nilai frekuensi (0 s/d nilai frekuensi pada nameplate motor) keluaran VFD ke motor listrik. Tiap tahap catat penunjukkan alat ukur pada tabel di bawah.
5. Setelah selesai melakukan pengukuran, switch OFF semua saklar-saklar.
6. Setelah selesai melakukan percobaan, kembalikan peralatan ke tempatnya semula.

Gambar Rangkaian:

a. VFD LS SV-IG5A

b. VFD Altivar 18

Tugas:

1. Catat data hasil pengukuran pada tabel.
2. Analisislah kemampuan daya output VFD Altivar 18 dan SV-iG5A
3. Jelaskan pengaruh v/f dari sumber output Altivar jika dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa !
4. Buatlah kesimpulan !

TABEL PERCOBAAN

Pengukuran			
Frekuensi (Hz)	Tegangan Line (U_L)	Kecepatan (RPM)	Daya (W)

KONTROL VFD	KARAKTERISTIK ALTIVAR 18	LEMBARAN KERJA-2
Aplikasi VFD		VFD/05/12

Tujuan:

Setelah melakukan praktek diharapkan petatar mampu :

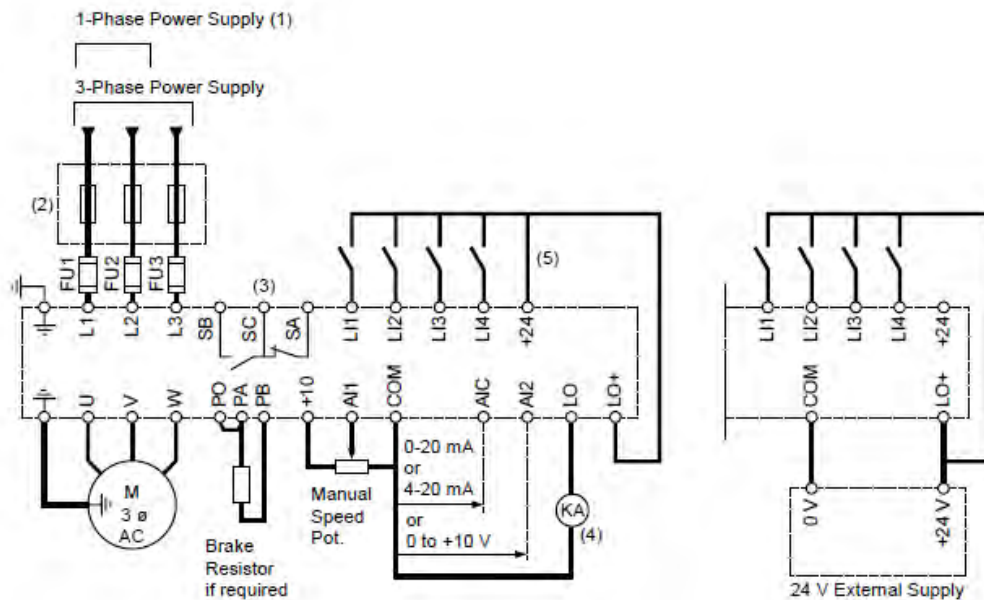
1. Merangkai rangkaian catu daya untuk pengendalian motor induksi dengan Altivar 18.
2. Mengoperasikan pengaturan motor induksi dengan Altivar 18.
3. Menganalisis karakteristik catu daya untuk pengendalian motor induksi dengan Altivar 18.

Petunjuk:

1. Sebelum melaksanakan tugas praktek ini, pelajarilah terlebih dahulu petunjuk penggunaan inverter Altivar 18 serta keamanan operasinya (Manual book).
2. Periksa semua peralatan sebelum digunakan, apakah bekerja dalam keadaan baik.
3. Jangan mengoperasikan peralatan tanpa persetujuan instruktur.

Alat dan Bahan:

1. Modul Altivar 18
2. Multimeter
3. Frekuensi-meter
4. Watt-meter
5. Tacho-meter
6. Kabel penghubung

Rangkaian Percobaan:

Langkah Kerja

Langkah Awal

1. Cermati terminal-terminal pada unit Altivar 18 sesuai Gambar Rangkaian Percobaan di atas.
2. Pelajari dengan seksama **Prosedur Operasi Altivar 18** ini sebagaimana terlampir.
3. Rangkailah unit Altivar sesuai dengan gambar rangkaian.
4. Cermati pemasangan : ***brake resistor*** **(jika di perlukan), Potensiometer, Switch S1, S2, S3, S4**
5. Perhatikan hirarki untuk mengakses parameter pada Altivar 18 dan fungsinya.
6. Lakukan setting semua parameter dar I Altivar 18 pada kondisi setting pabrik *(factory preset).*

Mengubah Operasi Frekuensi

1. Hubungkan selektor sumber pada posisi 1fasa (1 PH) 220 V
2. Set-lah frekuensi keluaran maksimum Altivar dengan mengatur parameter *tFr*, tentukan sebesar 150 Hz.
3. Set-lah parameter *LSP* (putaran motor terendah) pada 0,0 Hz dan *HSP* (putaran motor tertinggi) pada 150 Hz.
4. Kembalikan parameter pada posisi *rdy*.

5. Tekan tombol START, ON-kan sakelar S1, kemudian :
   - Atur parameter *FrH* (frekuensi setpoin) secara bertahap sesuai Tabel dengan mengatur potensiometer.
   - Ukurlah tegangan output Altivar untuk setiap tahapan frekuensi setpoin
6. Kembalikan parameter pada posisi *rdy*.
7. Tekan tombol STOP.
8. Lakukan seperti langkah 5 sampai dengan 7 di atas.

Tugas

1. Analisislah kemampuan daya output Altivar !
2. Jelaskan pengaruh v/f dari sumber output Altivar jika dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa !

KONTROL VFD	**KENDALI MOTOR INDUKSI TANPA BEBAN DENGAN ALTIVAR 18**	**LEMBARAN KERJA-3**
Aplikasi VFD		**VFD/05/12**

Tujuan:

Setelah melakukan praktek diharapkan petatar mampu :

1. Mengoperasikan pengaruh arus dan waktu pengereman injeksi *(Idc dan tdc)* terhadap putaran motor induksi 3 fasa.
2. Mengoperasikan pengaruh waktu akselerasi dan deakselerasi *(ACC dan dEC)* terhadap putaran motor induksi 3 fasa.

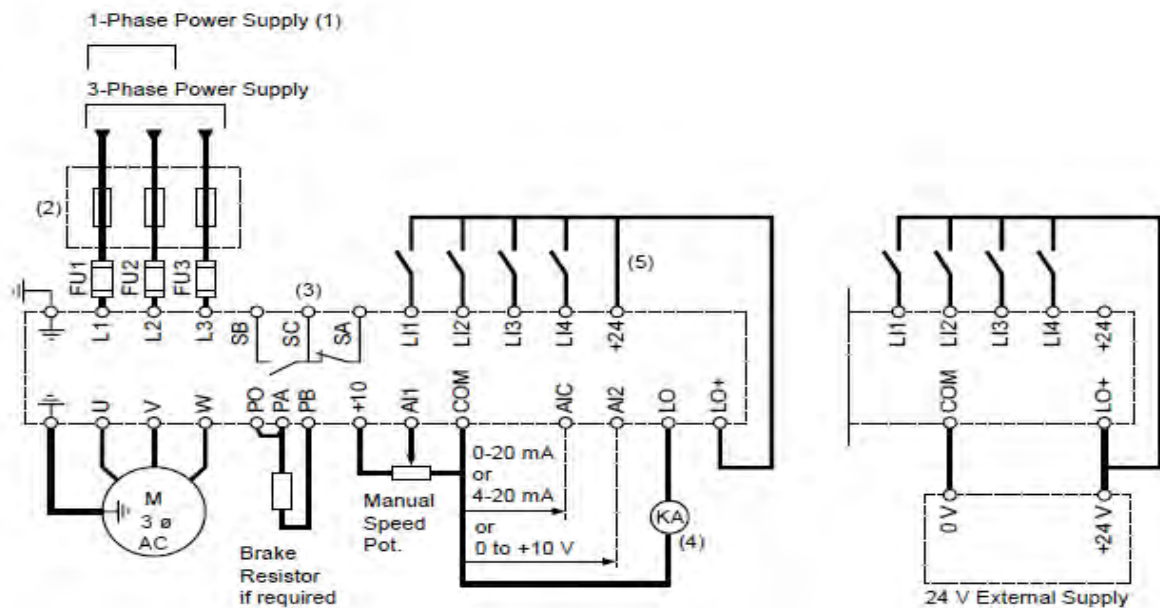
Petunjuk:

1. Sebelum melaksanakan tugas praktek ini, pelajarilah terlebih dahulu petunjuk penggunaan inverter Altivar 18 serta keamanan operasinya (Manual book).
2. Periksa semua peralatan sebelum digunakan, apakah bekerja dalam keadaan baik.
3. Jangan mengoperasikan peralatan tanpa persetujuan instruktur.

Alat dan Bahan:

1. Modul Altivar 18
2. Motor Induksi 3 fasa 220/380 V, 0,75 KW
3. Multimeter
4. Frekuensi-meter

5. Watt-meter
6. Tacho-meter
7. Kabel penghubung

Rangkaian Percobaan:

Langkah Kerja

- Cermati terminal-terminal pada unit Altivar 18 sesuai Gambar Rangkaian Percobaan di atas.
- Rangkailah unit Altivar 18 sesuai dengan Gambar Rangkaian.
- Cermati pemasangan : ***brake resistor*** **(jika di perlukan), Potensiometer, Switch S1, S2, S3, S4**
- Rangkailah motor induksi 3 fasa dengan sambungan bintang (Y), kemudian hubungkan dengan Altivar 18.

<u>Percobaan 1</u> : Mengoperasikan Altivar dengan Motor Induksi tanpa Beban

1. Hubungkan selektor sumber pada posisi 1 fasa (1PH) dengan tegangan 220 V.
2. Kembalikan semua parameter pada kondisi preset.
3. Set-lah parameter arus, tegangan, dan frekuensi nominal dari motor induksi 3 fasa pada Altivar *(ItH, UnS, dan FrS)*
4. Set-lah frekuensi keluaran maksimum Altivar dengan mengatur parameter *tFr*, tentukan sebesar 150 Hz.

5. Set-lah parameter *LSP* (putaran motor terendah) pada 0,0 Hz dan *HSP* (putaran motor tertinggi) pada 150 Hz.
6. Kembalikan parameter pada posisi *rdy*.
7. Tekan tombol START, ON-kan sakelar S1, kemudian :
   - Atur parameter *FrH* (frekuensi setpoin) secara bertahap sesuai Tabel Percobaan atau dengan mengatur potensiometer.
   - Ukurlah frekuensi, tegangan, arus, dan putaran motor untuk setiap tahapan frekuensi setpoin
8. Tekan tombol STOP.
9. Ulangi langkah 6 sampai dengan 7.

<u>Percobaan 2</u> : Mengoperasikan Arus dan Waktu Injeksi, serta waktu Akselerasi dan Deakselerasi

1. Jangan diubah setting parameter pada percobaan 1.
2. Atur setting *Idc, tdc, ACC, dEC* dari kondisi factory preset sampai dengan minimumnya sebanyak 5 tahapan.
3. Lakukan langkah 6 sampai dengan 9 dari percobaan 1 di atas.

Tugas

1. Jelaskan pengaruh perubahan v/f dari sumber output Altivar terhadap putaran motor!
2. Jelaskan pengaruh perubahan frekuensi dan *Idc, tdc, ACC,* serta *dEC* terhadap putaran motor !
3. Jelaskan hubungan pengaruh *Idc, tdc, ACC,* dan *dEC* terhadap pengereman motor !

DAFTAR PUSTAKA

Barnes, Malcolm:2003, *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*, Perth, Australia.

Brown, Mark, *Practical Troubleshooting Electrical Equipment and Control Circuit*, Newnes Linacre, Jordan Hill, Oxford, 2005

Didi Kurniadi,M.Pd. Modul Aplikasi VSD, PPPPTK BMTI. 2012

Istanto W. Djatmiko:2007,Modul Praktek kendali Elektronik, Prodi. Teknik Elektro Fakultas Teknik UNY, Yogyakarta.

……………..,Perakitan dan Pengoperasian Sistem Kendali, SMK N 2 Jogyakarta.

Juhari, S.Pd. Modul Prinsip dan Operasi VSD, PPPPTK BMTI, 2012

Winarso Adi Sukarno.Kontrol Berbasis Thyristor.PPPPTK BMTI. 2011

LS-SV-iG5A User's Manual

Altivar 18 User's Manual